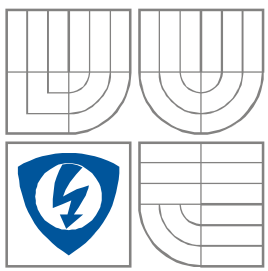
	<p>VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY</p>
	<p>FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ</p> <p>FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING</p>

ČASOVÉ VZORKOVÁNÍ OBRAZOVÉHO TOKU

IMAGE FLOW TIME SAMPLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

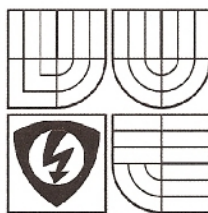
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Miroslav Němec

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Aleš DRASTICH, CSc.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Student: Němec Miroslav, Bc.
Ročník: 2

ID: 48915
Akademický rok: 2008/09

NÁZEV TÉMATU:

Časové vzorkování obrazového toku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte ideové schéma modelu časového vzorkování obrazového toku s přihlédnutím na různé faktory, které vzorkování ovlivňují. Model bude tvořit laboratorní úlohu v předmětech zabývajících se procesem zobrazení. Model realizujte v prostředí MATLAB.

Práce musí obsahovat:

teoretický rozbor, ideové schéma programu a dosažené výsledky realizované části.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


- [1] Drastich, A.: Netelevizní zobrazovací systémy. Skriptum ÚBMI FEI VUT Brno, 2001
- [2] Drastich, A.: Tomografické zobrazovací systémy. Skriptum ÚBMI FEKT VUT Brno, 2004
- Oppelt, A.: Imaging Systems for Medical Diagnostics. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2005

Termín zadání: 30.10.2008

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Drastich, CSc.

Konzultanti diplomové práce:


prof. Ing. Jiří Jan, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Miroslav Němec
Bytem: Lelekovice 225 ,66431, Lelekovice
Narozen/a (datum a místo): 10. června 1983 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Jan, CSc, předseda rady oboru Biomedicínské a ekologické inženýrství
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- .. disertační práce
- ☒ diplomová práce
- .. bakalářská práce
- .. jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Časové vzorkování obrazového toku

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Aleš Drastich, CSc.

Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činnost dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Časové vzorkování obrazového toku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Aleši Drastichovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Anotace:

Cílem diplomové práce je vypracovat teoretický úvod do problematiky časového vzorkování obrazového toku, s přihlédnutím na různé faktory, které vzorkování ovlivňují. Dále navrhnout ideové schéma modelu, který bude simulovat popsané jevy, a daný model vytvořit v programovacím prostředí Matlab. V poslední řadě definovat laboratorní cvičení, které bude podporou výuky zabývající se zobrazovacími systémy.

Annotation:

The aim of this Master's thesis is to develop a theoretical introduction to the issue of the image flow time sampling, taking into account the various factors that affect sampling. Furthermore, there is proposed idea diagram of the model, which will simulate the events described, and created the model in the programming environment Matlab. Finally, there are defined the labs that will support teaching dealing with the imaging systems.

Klíčová slova:

DSP, vzorkování, obrazový tok, Nyquistův teorém, aliasing, zkreslení, pohybové zkreslení, zobrazovací systém.

Key words:

DSP, sampling, image flow, Nyquist theorem, aliasing, distortion, motion distortion, an imaging system.

Bibliografická citace:

NĚMEC, M. *Časové vzorkování obrazového toku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Aleš Drastich, CSc.

Obsah

ÚVOD	9
1 SIGNÁLY A OBRAZOVÁ DATA	10
1.1 Definice signálu	10
1.1.1 Rozdělení signálů	11
1.2 Diskretizace	12
1.2.1 Vzorkování	12
1.2.2 Kvantování	14
1.2.3 Nyquistův teorém	15
1.2.4 Vzorkování obrazových dat	15
1.2.5 Časová diskretizace obrazového toku	18
1.2.6 Zkreslení signálu	20
1.2.6.1 Aliasing	20
1.2.6.2 Efekt loukoťového kola	23
1.2.6.3 Pohybová neostrost	25
2 MODEL VZORKOVÁNÍ OBRAZOVÉHO TOKU	27
2.1 Model ověření Nyquistova teorému	29
2.1.1 Model efektu loukoťového kola	30
2.1.1.1 Konstrukce programu louk.m	30
2.1.1.2 Zobrazení v reálném čase s flicker efektem	33
2.1.1.3 Výsledky simulací	34
2.1.2 Model efektu loukoťového kola v reálném čase	35
2.1.2.1 Konstrukce programu Real-time.m	35
2.1.3 Model ručičkových hodin	36
2.1.3.1 Konstrukce programu hod.m	36
2.1.3.2 Výsledky simulací	38
2.1.4 Model vzorkování s použitím reálné scény	39
2.1.4.1 Popis experimentu	39
2.1.4.2 Konstrukce programu rotfm.m	40
2.1.4.3 Výsledky simulací	41
2.2 Model pohybového zkreslení	42
2.2.1 Konstrukce programu pohyb.m	42
2.2.2 Výsledky simulací	45
2.3 Instalace programu	46
3 LABORATORNÍ ÚLOHA	47
ZÁVĚR	53
LITERATURA	54

Seznam obrázků

Obr.1:	Záznam a reprodukce signálu.....	13
Obr.2:	Ideové schéma kvantování.....	14
Obr.3:	Znázornění obrazového toku.....	17
Obr.4:	Čtvercová a hexagonální mřížka.....	17
Obr.5:	Znázornění pole Diracových funkcí a spekter signálu.....	18
Obr.6:	Vzorkování obrazového toku –formy	19
Obr.7:	Správné (a,b) a nesprávné(c,d) vzorkování signálu	21
Obr.8:	Ukázka moire efektu při snímání textury	22
Obr.9:	Ukázka zkreslení nedostatečným prostorovým rozlišením	23
Obr.10:	Snímání hodin po 50ti minutách.....	25
Obr.11:	Náhodně vygenerovaný šumový obraz a následné rozmazání.....	27
Obr.12:	Globální schéma programu CVOT.....	29
Obr.13:	Primární okno programu CVOT.m.....	30
Obr.14:	Rotačně-symetrický obraz-model loukoťového kola.....	31
Obr.15:	Blokové schéma skriptu louk.m.....	32
Obr.16:	Dialogové okno podprogramu louk.m.....	33
Obr.17:	Dialogové okno pro zobrazování v reálném čase skriptu louk.m.....	34
Obr.18:	Blokové schéma programu Real-time.m.....	36
Obr.19:	Dialogové okno programu RealTime.m.....	37
Obr.20:	Blokové schéma modelu ručkových hodin.....	38
Obr.21:	Dialogové okno programu hodiny.....	39
Obr.22:	Průběhy vzorkování modelu hodin.....	40
Obr.23:	Blokové schéma programu rotfm.m.....	42
Obr.24:	Dialogové okno programu rotfm.m.....	42
Obr.25:	Dialogové okno modelu pohybového zkreslení.....	43
Obr.26:	Blokové schéma programu Pohybová neostrost.....	44
Obr.27:	Simulace pohybového zkreslení.....	44
Obr.28:	Simulace pohybového zkreslení – úhel 323°, rychlost 10pixelů.....	45
Obr.I	Blokové schéma programu.....	48
Obr.II	kontextové nabídky.....	49
Obr.III	Model efektu loukoťového kola.....	50
Obr.IV	Model efektu loukoťového kola Real-time zobrazení.....	50
Obr.V	Interaktivní Real-time zobrazení loukoťového kola.....	51
Obr.VI	Model reálné scény.....	52
Obr.VII	Vzorkování hodin.....	52
Obr.VIII	Model pohybového zkreslení.....	53

Úvod

Cílem této práce je navrhnout a realizovat laboratorní úlohu, která bude simulovat jevy vznikající při časovém vzorkování obrazového toku.

Práce je rozdělena do několika částí. V první teoretické části byly stručně rozebrány charakteristiky signálů a jejich diskretizace. Dále vybrané jevy, které vznikají při nekorektním vzorkování obrazových dat a jejich potlačení.

Ve druhé ,praktické části, byl vytvořen model, který byl následně realizován v programovacím prostředí Matlab. Výsledkem je pak softwarové prostředí, kde si studenti předmětů zabývajících se procesem zobrazení mohou ověřit teoretické vlastnosti dané problematiky a může být použito pro výuku v laboratořích. Podrobně jsou popsány jednotlivé části programu, metody použité při konstrukci programu, související komplikace a jejich řešení. Po konzultaci s vedoucím práce byly vybrány a následně realizovány jen některé jevy týkající se velmi rozsáhlé problematiky časového vzorkování obrazových dat.

Třetí částí je pak vlastní definice laboratorní úlohy obsahující zadání, návod a výsledky resp. možné výstupy programu.

1 Signály a obrazová data

Cílem této části je shrnout základní poznatky a pojmy z teorie zpracování signálů a osvětlit některé skutečnosti, které doprovázejí zpracování signálů do digitalizované podoby. Vzhledem k rozsáhlosti tématu jsou zde vybrány pouze některé části, které korespondují s tématem práce a představují pouze stručný přehled potřebný k vysvětlení jevů, které budou modelovány v praktické části práce.

1.1 Definice signálu

Velmi důležité pro pochopení následující látky je přesné vymezení pojmů a jejich rozdělení.

Pro pojmem signál snad neexistuje jednoznačná definice a jednotlivé definice se od sebe liší i v různých inženýrských oborech. Závisí na zaměření a úhlu pohledu jednotlivých odborníků.

Z obecného hlediska je signál většinou fyzikální veličinou nesoucí nějakou informaci. Velmi dobře tento pojem vysvětluje definice uvedená v [1]:

„Signál je fyzikální vyjádření zprávy. Informace je část zprávy, která přináší příjemci zprávy nové poznatky. Nositelem informace mohou být pouze ty signály, jejichž časový průběh nelze na straně příjemce signálu přesně predikovat.“

Z pohledu systému je signál dobře definovaný v práci I. Rekleitise [9] (volně přeloženo):

Signály obecně zprostředkovávají informaci o stavu nebo chování fyzikálních systémů a jsou často syntetizovány za účelem výměny informací mezi lidmi, mezi člověkem a strojem nebo stroji navzájem. Stroji zde rozumíme umělé systémy zpracovávající signály a následně informace.

Zde se objevuje pojem informace, která se dá vysvětlit použitím všeobecně známých faktů. Zejména informace přenáší údaje o skutečném prostředí, snižuje nebo odstraňuje neurčitost a především je brána ve vztahu k příjemci.

Příkladem fyzikální veličiny může být elektrické napětí, nebo proud. Z neelektrických lze vybrat například teplotu, tlak, vlhkost aj. Z pohledu člověka je vnímání a zpracování signálů a informací v nich obsažených determinováno smyslovými orgány a psychosenzorickými vjemy, zprostředkovanými právě těmito orgány a následně zpracovávány centrální nervovou soustavou. Lidskými smysly jsou zrak, sluch, hmat, čich a chuť. Zde jsou seřazeny podle významnosti. Z toho vyplývá, že zrak je nejdůležitějším smyslem a také přenáší nejvíce informací z okolního prostředí.

1.1.1 Rozdělení signálů

Jako základní je používáno rozdělení z hlediska zpracování signálu [3] na čtyři kategorie a to

1. *Analogový signál*, kde signál má spojitý čas a spojitou amplitudu.
2. *Signál diskrétní v čase* avšak se spojitou amplitudou
3. *Více úroňové* tzn. signály se spojitým časem ale diskrétní amplitudou
4. *Číslicové* neboli digitální, které mají diskrétní čas i amplitudu

Ad 1) Takový signál je produkován reálným prostředím, které nás obklopuje. Podle definice z [3] nazýváme analogový resp. spojitý signál (po částech) spojitou funkci $f(x)$ spojitě proměnné x , kterou je nejčastěji čas, může jí být i prostorová vzdálenost nebo jiná veličina.

Ad 2) Diskrétní signál v čase je uspořádaná posloupnost hodnot $f(x) = f(i)$, která je funkcí celočíselného indexu i . Z teoretického hlediska je lhostejné, jak posloupnost vznikla. Nejčastěji jde o sérii hodnot nějakých měření [3]. Viz dále v textu.

Ad 3) K matematickému popisu se téměř nepoužívá.

Ad 4) Podle [3] je číslicový signál takový diskrétní signál, jehož hodnoty jsou vyjádřeny z nějaké konečné číselné množiny. Poznamenejme, že diskretizace nejen co do času, ale také co do hodnot je podstatnou vlastností číslicových signálů, která v některých situacích významně ovlivňuje výsledky zpracování.

Dále se signály dělí podle energie na výkonové, které mají nekonečnou energii, a energetické s energií konečnou. A konečně z hlediska matematického popisu na deterministické (periodické, multifrekvenční, přechodné) a stochastické resp. náhodné (stacionární, nestacionární) [4].

1.2 Diskretizace

1.2.1 Vzorkování

Jak již bylo vysvětleno výše, signálem se rozumí jakákoliv fyzikální veličina, která je předmětem zájmu. Signály se kolem nás vyskytují pouze v analogové resp. spojitě podobě a jsou tedy reprezentovány nekonečně mnoha hodnotami. Aby s nimi mohlo být dále pracováno, je nezbytné je převést do nějaké přijatelné podoby.

Práce s analogovým signálem je možná pouze pomocí analogových zařízení, které se signálem pracují v reálném čase. Získávání, klasifikace a úprava či zobrazení je tím složitější, čím komplexnější je očekávaný výsledek. Z toho plynou jistá omezení takovýchto systémů. Zejména se kladou velmi vysoké nároky na návrh systému a jeho přesnost. Neomezené také nejsou prostředky a technologie, například při výrobě diskrétních součástek a integrovaných obvodů, které takovéto signály zpracovávají. Právě proto vznikla myšlenka odstranit nepotřebnou redundanci signálů a tím je převést do podoby vhodnější pro zpracování.

Za základní převod se považuje vzorkování signálu tedy časová diskretizace signálů. Ve většině případů se jedná hodnoty nějaké spojitě funkce $f(t)$, která je spojitá v čase. Příkladem může být analogový signál reprezentovaný například sinusovým průběhem napětí na výstupu generátoru, který je následně přiveden na vstup A/D převodníku. Ten v určitých časových intervalech přečte hodnotu signálu v časových okamžicích $t_i, i = 0, 1, \dots, n$, přičemž je zpravidla vzorkování rovnoměrné. Vzdálenost jednotlivých hodnot od sebe je tzv. vzorkovací perioda T , takže [3]

$$f(n) = f(t_n) = f(nT), \quad (1.1).$$

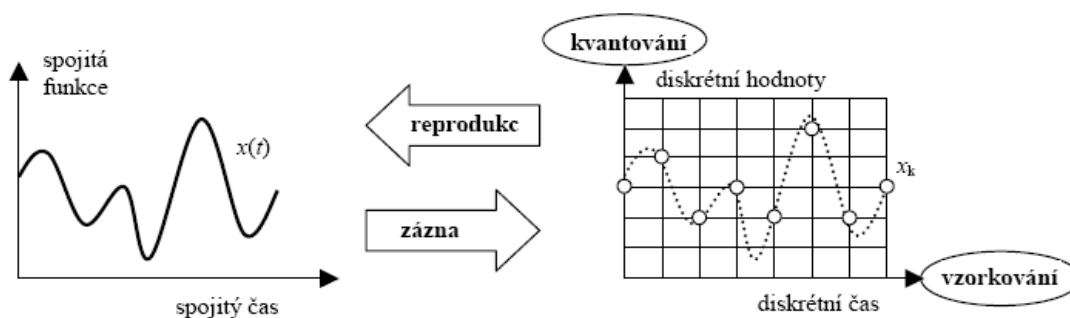
Laicky řečeno, je to časový údaj udávající, za jak dlouho přijde další hodnota. Převrácená hodnota periody vzorkování se nazývá vzorkovací frekvence f_v resp. úhlová vzorkovací frekvence ω_v . Vztah je zřejmý ze vzorce:

$$f = \frac{1}{T} [\text{Hz}], \quad (1.2)$$

kde f je frekvence a T je perioda udávaná v sekundách.

Stanovení vzorkovací frekvence resp. periody vzorkování je poměrně složitá úloha. Výstupem vzorkování je zachycená informace vstupního signálu konečným počtem vzorků. Zde vyvstává otázka počtu vzorků za časovou jednotku. Pokud by byla zvolena příliš vysoká vzorkovací frekvence, což se nazývá převzorkování nebo oversampling, neúměrně naroste objem dat, přičemž informace bude zachována ve věrné podobě původní informací. Naopak zvolením příliš nízké frekvence, což se nazývá podvzorkování též, subsampling dojde ke ztrátě informace ze signálu a při obnově je získán signál nikoliv původní, ale úplně jiný. Obnova by tedy nebyla možná bez ztráty informace.

Převzorkování i podvzorkování jsou techniky hojně využívané v některých aplikacích. V situaci, kdy není potřebná přímo informace o přesném průběhu signálu například u rozměřování signálu EKG, jsou redundantní složky potlačeny a probíhá pouze detekce peaků signálu s měřením jejich periody neboli tzv. R-R intervalu. Tady je podvzorkování velmi důležité pro rychlost detekce a zpracování výsledků rozměření. Jelikož je signál EKG kvaziperiodický, užívá se i proměnná vzorkovací frekvence v závislosti na tepové frekvenci srdce. Naopak převzorkování poskytuje jistou redundanci dat a tudíž zachycení odchylek od původní frekvence, pro kterou bylo vzorkování nastaveno. Tím pádem nepřijdeme o důležité informace. Příkladem může být opět signál EKG, kdy například při komorové fibrilaci se tepová frekvence zvýší a původní vzorkovací frekvence by byla již nedostatečná. Redundance dat v tomto případě příliš nevádí, jelikož signál sám o sobě má nízkou frekvenci v porovnání s běžnými analogově-digitálními převodníky, které takovéto signály bez větších problémů dokáží zpracovat.



Obr.1: Záznam a reprodukce signálu [13]

Při matematickém popisu je velmi užitečným signálem Diracova distribuce označovaná jako jednotkový impuls [3]

$$d(t) \rightarrow \infty \text{ pro } t=0, \quad d(t)=0 \text{ pro } t \neq 0, \text{ přičemž } \int_{-\infty}^{\infty} d(t)dt = 1. \quad (1.3)$$

Pomocí vzorkovacího signálu

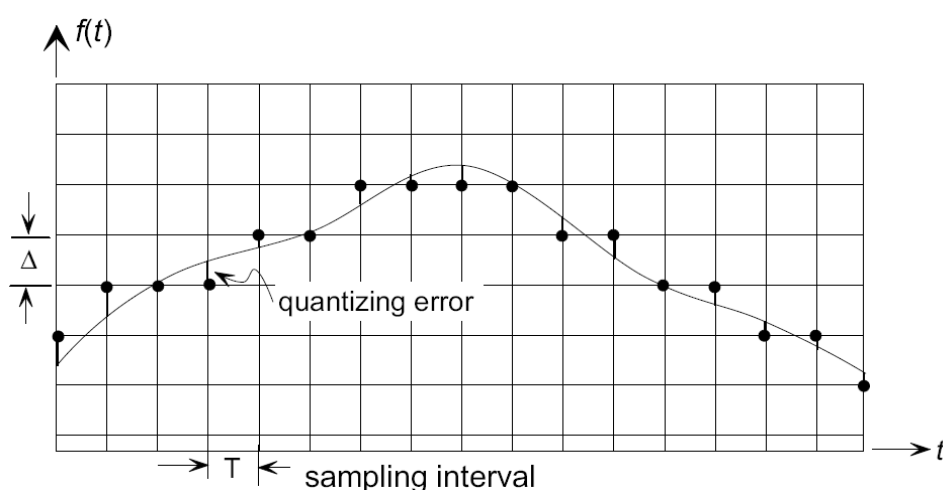
$$v(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} d(t-iT), \quad (1.4)$$

kde T je perioda vzorkování s vzorkovacím úhlovým kmitočtem $\omega_v = 2\pi/T$, vyjádříme vzorkovaný signál součinem spojitého signálu se signálem vzorkovacím

$$f_v(t) = f(t) \cdot v(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} f(iT)d(t-iT). \quad (1.5)$$

1.2.2 Kvantování

Reálný signál je nejen funkcí spojitě reálné proměnné v čase, ale obsahuje také nekonečně mnoho hodnot co do amplitudy signálu resp. jeho velikosti. Pro snadnější práci je třeba diskretizovat i jeho amplitudovou modulaci. Těto diskretizaci se říká kvantování, a rozumí se tím převod z nekonečně mnoha hodnot amplitudy na jejich konečný počet. Kvantovací rozsah je brán jako množina ekvidistančních hodnot, která má stupňovitý charakter [7]. V číslicové technice se rozsahy volí jako mocniny 2^n , kde n znamená počet bitů digitální reprezentace amplitudy. Na Obr.2 je názorně naznačena idea diskretizace spojitého signálu co do času i amplitudy. Vzorkovanému signálu jsou postupně přiřazeny hodnoty na časové ose (t) a funkční hodnoty jednotlivých vzorků. Přitom Δ vyjadřuje velikost kvantizačního kroku a T periodu vzorkování. Průběh signálu je v jednotlivých vzorcích zaokrouhlován k nejbližší kvantovací hodnotě a tím vzniká kvantizační chyba. V průběhu signálu se tato chyba projeví jako kvantizační šum.



Obr.2: Ideové schéma kvantování [8]

1.2.3 Nyquistův teorém

Postup vzorkování a kvantování signálu a jeho obnovení je naznačeno na Obr.1. Stěžejní je hodnota frekvence vstupního signálu, od které se odvíjí hodnota vzorkovací frekvence. Pravidlo, podle kterého se volí vzorkovací frekvence se nazývá **Nyquistův teorém** (také Shannonův teorém, Nyquistův-Shannonův teorém, Kotělníkův teorém, apod.).

Ten říká [12]:

„Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného, signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byl vzorkován frekvencí alespoň dvakrát vyšší než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu.“

Vztah mezi vzorkovací frekvencí a frekvencí původního signálu je

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{vst}, \quad (1.6)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a f_{vst} je frekvence spojitého (vstupního) signálu.

Shrnou-li se tyto poznatky, dojde se ke zjednodušenému závěru, že vzorkování znamená vynechání úseků záznamu a kvantování znamená zaokrouhlování přesných hodnot vzorků. Obě tyto operace způsobují ztrátu informačního obsahu signálu a mohou vést k tzv. aliasingu viz dále v textu.

1.2.4 Vzorkování obrazových dat

Doposud se teorie diskretizace týkala pouze jednorozměrných signálů. Počet nezávislých proměnných ale není principiálně omezen, pak mluvíme o signálech dvoj- troj- a více rozměrných [3]. Stejně jako u obecných spojitých signálů, tak i časoprostorová scéna (4D scéna), má-li být zpracována digitálními zobrazovacími systémy musí být diskretizována.

Zobrazovacím systémem se převádí prostorová (3D) nebo časoprostorová (4D) scéna neboli prostorové resp. časoprostorové rozložení fyzikální veličiny na její reprodukci. Tato reprodukce je schopna vyvolat zrakový vjem. Takto vzniklý vícerozměrný prostor distribuce fyzikální veličiny (předmětový prostor/scéna) je primárním parametrem. O plošné 2D distribuci vyvolávající zrakový vjem se hovoří jako o výsledném parametrickém poli - obrazu scény [5].

Modulace je proces, ve kterém je určitým způsobem přetvářen jeden signál (tzv. nosný) druhým signálem, který nese informaci (tzv. modulační) [5].

Jakákoliv scéna, která je vnímána zrakem, je reprezentována obrazovým tokem $o(x,z,t)$. To znamená, že scéna se stále nějakým způsobem vyvíjí v čase. Obrazový tok lze vyjádřit Fourierovým integrálem [5]

$$o(x, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} O(w_x, w_y, w) e^{j(w_x x + w_y y + w t)} dw_x dw_y dw, \quad (1.7)$$

kde O je předmětová funkce, w_x, w_y jsou prostorové kmitočty a w je časový úhlový kmitočet.

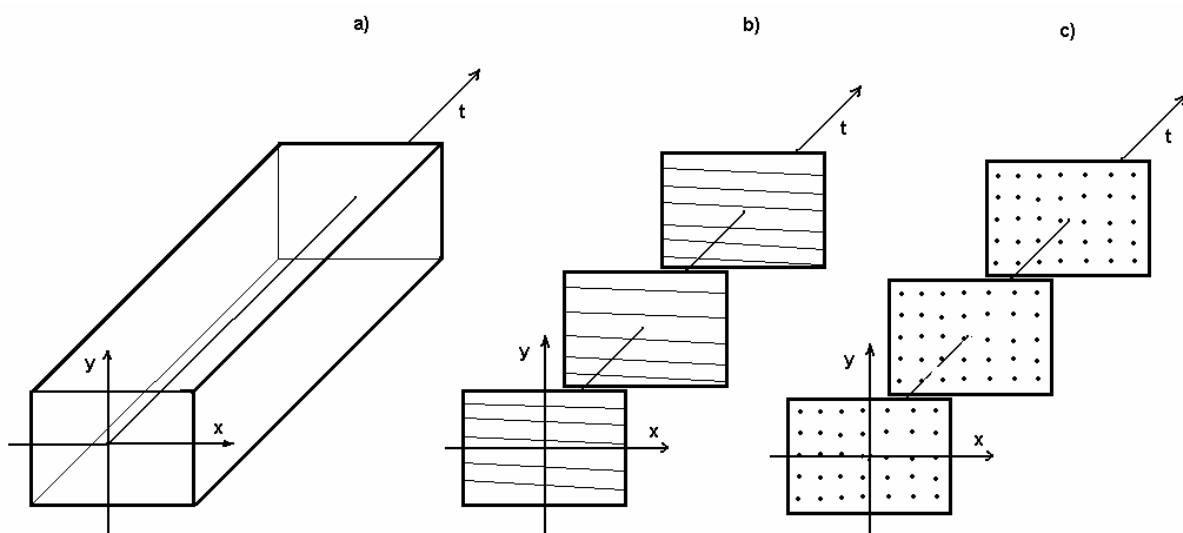
Výsledná diskretizace závisí na zobrazovacím systému, kterým je zobrazovaná scéna snímána, tj. prostorovým rozkladem primárního parametrického pole buď skenováním nebo mozaikou detektorů. Potom je třeba násobit obrazovou funkci rozkladovou $r(x,z,t)$ resp. diskretizační funkcí $d(x,y,t)$ [5]

$$i_{vzork.} = o(x,y,t)r(x,y,t), \quad (1.8a)$$

resp.

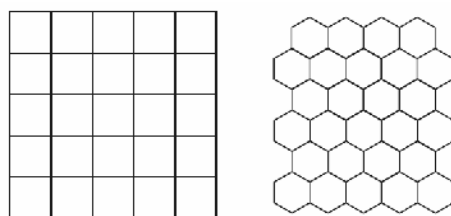
$$i_{vzork} = o(x,y,t)d(x,y,t). \quad (1.8b)$$

Na Obr.3a je graficky znázorněn obrazový tok $o(x,y,t)$ jako soubor nekonečně mnoha obrazů za sebou, reprezentující spojitý vývoj ve scéně. Obr.3b a Obr.3c jsou jeho diskrétní podoby, kdy v prvním případě jde o násobení rozkladovou řádkovou funkcí, tedy diskretizaci v časové oblasti a ve směru osy y . Tento případ je charakteristický pro skenovací zobrazovací systémy a je velmi dobře známý jako řádkový rozklad televizní obrazovky. Ve druhém případě tedy Obr.3c je obraz diskretizován též v časové oblasti a ve směru osy y ale i ve směru osy x . Je používán v zobrazovacích systémech se současným zaváděním informace tj. neskenovací systémy. Tyto systémy mají pole detektorů, které snímají scénu všechny současně. Vzniká tím matice parametrů, charakterizující primární parametrické pole např. jasové hodnoty resp. jasovou modulaci u zobrazení ve stupních šedi. Diskretizovaný obraz je tedy řez obrazovým tokem ve vzdálenostech Δt , které jsou vzorkovací periodou analogového signálu, tedy vývoje primárního parametrického pole v čase.



Obr.3: a) Znáznění obrazového toku, b) a c) jeho diskretizace [5]

Důležitou součástí digitalizace je volba vzorkovací mřížky. Nejznámějšími typy jsou mřížky čtvercové a hexagonální. Čtvercová mřížka vychází z konstrukce většiny snímacích prvků, jako jsou CCD snímače, a je velmi snadno realizovatelná. Má však i své nevýhody, například měření vzdáleností v diagonálním směru apod. Hexagonální mřížka většinu těchto problémů řeší, ale není vhodná pro některé operace jako je například Fourierova transformace [5]. V současnosti je nejpoužívanější rozložení čtvercové resp. maticové.



Obr.4: Čtvercová a hexagonální mřížka [10]

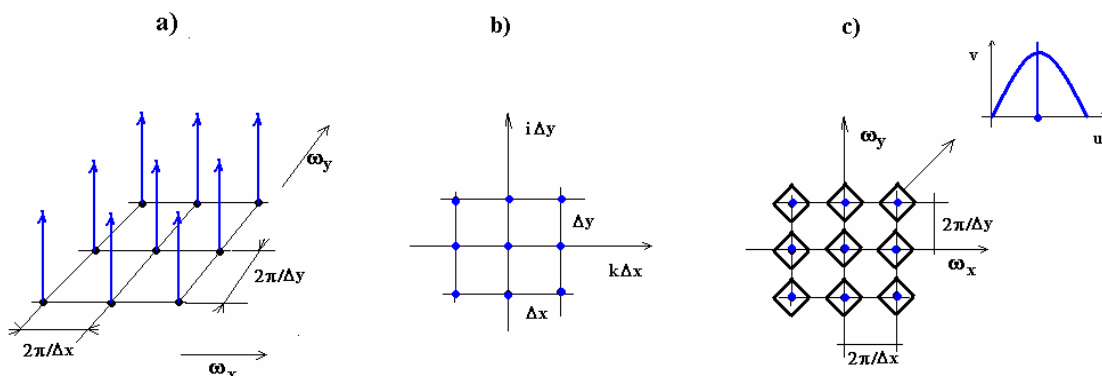
Jako diskretizační funkce může být použito diskrétní 2D pole Diracových funkcí vzdálených od sebe v ekvidistantní síti s kroky $\Delta x, \Delta y$, pak s využitím filtračních vlastností Diracových impulsů je možné navzorkovaný obraz vyjádřit jako [5]:

$$i_{vzork.} = i_v(x, y) = \sum_i \sum_k o(k\Delta x, i\Delta y) \cdot d(x - k\Delta x, y - i\Delta y). \quad (1.9)$$

S využitím Fourierovy transformace se může konvolucí obrazového pole s 2D polem Diracových funkcí ve frekvenční oblasti získat pole periodicky se opakujících spekter. Toto vyjadřuje rovnici (1.8b) ve frekvenční oblasti a má tvar

$$I_{vzork.} = I_v(w_x, w_y) = O(w_x, w_y) * D(w_x, w_y). \quad (1.10)$$

Na Obr.5a je graficky znázorněna diskretizační funkce v prostorové rovině jako pole Diracových impulsů umístěných v uzlových bodech diskretizační mřížky čtvercového tvaru. Obrázek Obr.5b znázorňuje totéž jen v obrazové rovině a následně je naznačeno periodizující se spektrum na Obr.5c.



Obr.5: Znázornění pole Diracových funkcí a spekter signálu

I při diskretizaci obrazů je třeba dodržet Nyquistovo kritérium. Zde je možné přepsat známou větu do tvaru lépe vhodného pro obrazy a 2D rovinu. Tedy vzorkovací frekvence resp. prostorové vzorkovací kmitočty musejí být alespoň dvojnásobkem prostorových kmitočtů nejmenších detailů, které jsou třeba zachovat. Vzorkovací teorém má pro obraz tvar [9]

$$\Delta x \leq \frac{p}{w_{xm}}, \quad \Delta y \leq \frac{p}{w_{ym}}, \quad \text{resp.} \quad \Delta x \leq \frac{1}{2u_m}, \quad \Delta y \leq \frac{1}{2v_m}. \quad (1.11)$$

To je jedna, nikoliv jediná, podmínka správného vzorkování. Při diskretizaci obrazu, jak již bylo zmíněno, vzniká pole periodicky se opakujících spekter uspořádaných ortogonálně na mřížce. Jsou od sebe vzdáleny přesně o násobky prostorových kmitočtů $2p/D_x$ a $2p/D_y$. Bez omezení spektra na mezní úhlové kmitočty w_{xm} a w_{ym} by docházelo k překryvu spekter a následnému vzniku nežádoucích artefaktů v obraze, k aliasingu. Pro věrné obnovení původního obrazu je třeba odstranit všechny repliky spektra kromě toho základního v původní spektrální poloze tzn. v počátku roviny. Toho lze dosáhnout například aplikací funkce $\text{sinc}(x)$ resp. $\text{sinc}(y)$. Funkce sinc má díky svému průběhu vynikající filtrační vlastnosti charakteristické pro dolní propust.

1.2.5 Časová diskretizace obrazového toku

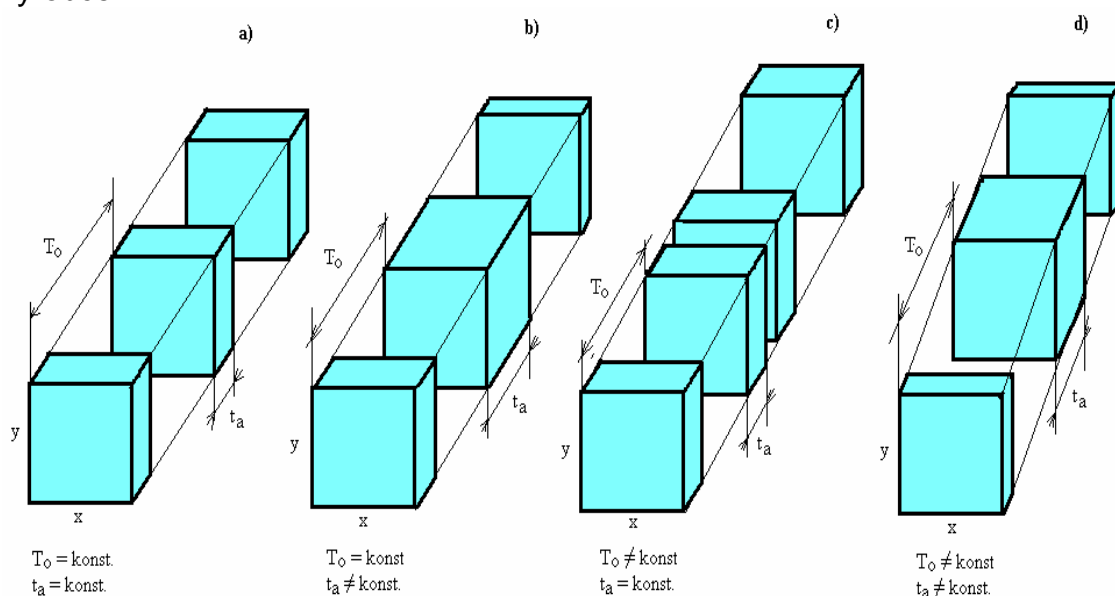
Při diskretizaci obrazového toku podle rovnice (1.8) jsou uvažovány nejen prostorové souřadnice, ale i časová distribuce. Nejdříve si je nutné definovat

základní parametry vzorkování a to časovou vzorkovací frekvenci a časovou aperturu vzorkování.

Stejně jako v předchozích případech se zde vyskytuje vzorkovací frekvence f_v a její převrácenou hodnotu tj. periodu vzorkování T_v ($f_v = 1/T_v$). Ta reprezentuje, jak daleko od sebe budou jednotlivé řezy obrazového toku vzdáleny, nebo také jejich četnost za jednotku času. Vzorkovací frekvence stěžejní pro zachycení rychlých změn ve scéně.

Časová apertura t_a vyjadřuje, jakou dobu se bude provádět sběr dat z obrazového toku na jeden obraz. To má velký vliv na energetickou rozlišovací schopnost zobrazovacího systému a ovlivňuje také SNR, tedy poměr signálu k šumu. Velká časová apertura zvětší SNR při konstantním šumovém pozadí, ale má za následek vznik pohybových neostrostí. Malá časová apertura se lépe vypořádá s rychlými změnami ve scéně, ale důsledek je menší energie, která dopadne na snímací prvek a tedy zhoršení poměru signál/šum. Velmi dobrým příkladem může být závěrka fotoaparátu. Čím déle bude otevřená, tím více světla dopadne na filmové políčko a při špatném osvětlení sumace energie na filmu poskytne dobrý výsledek. Bohužel je zde podmínka statičnosti scény, kdy jakýkoliv pohyb ve scéně snímek rozmaže (pohybová neostrost). Proto je dobré nejdříve analyzovat předpokládaný vývoj scény co do dynamiky a podle toho nastavit časovou aperturu snímání. Například bude-li snímána krajina, dům apod., kde není předpoklad pohybu, může se volit větší apertura (závěrka), samozřejmě s ohledem na osvětlení scény. Při snímání pohybujících se objektů např. sportovní výkony zvířata apod. je žádoucí pořídit snímek v co nejkratším čase tj. malou aperturou, kdy se vyvarujeme pohybové neostrosti.

Obr.6 velmi názorně popisuje čtyři různé formy vzorkování obrazového toku [2]. V prvním případě (Obr.6a) je pevně dána jak vzorkovací frekvence, tak i časová apertura vzorkování. Toto je charakteristické pro nejjednodušší systémy, například domácí videokamera, která f_{vz} a t_a má pevně nastavené od výrobce.



Obr.6: Vzorkování obrazového toku -formy

Vzorkování podle Obr.6b má konstantní vzorkovací kmitočet, ale proměnnou časovou aperturu. Tohoto se využívá při snímání scén s malým zářivým tokem – zobrazují prostorovou distribuci jednotlivých fotonů (impulsní detekční doba) [5]. Počet jednotlivých fotonů, které byly použity k vytvoření jednotlivých obrazů, utváří šum výsledných obrazů. Zejména u gama-zobrazovacích systémů se využívá tohoto způsobu časové diskretizace a tzv. předvolby počtu registrovaných fotonů, tzn. předvolba celkové energie potřebné k vytvoření obrazu. Časová apertura je tedy tak dlouhá, dokud suma energie nepřekročí stanovený limit.

Třetím způsobem časové diskretizace je proměnná vzorkovací frekvence s konstantní časovou aperturou (Obr.6c). Tato metoda se zejména využívá k zobrazení změn ve scéně, které se kvaziperiodicky mění. Např. u kardiologických zobrazovacích systémů, které musejí zachytit srdce, které se pohybuje s určitou tepovou frekvencí, je velmi výhodná synchronizace s R-R intervaly signálu EKG.

Čtvrtá metoda na Obr.6d má proměnnou jak vzorkovací frekvenci, tak i časovou aperturu. Využívá se, stejně jako předchozí metoda, zejména v kardiologii, při snímání nízkých zářivých toků při kvaziperiodicky měnící se scéně. Je typické pro gama-zobrazovací systémy [5]. Každá metoda je specifická pro různé potřeby zobrazování a je to otázka potřeb, nároků, kvality a zejména použité technologie akvizice, kterou z možností časového vzorkování zvolit.

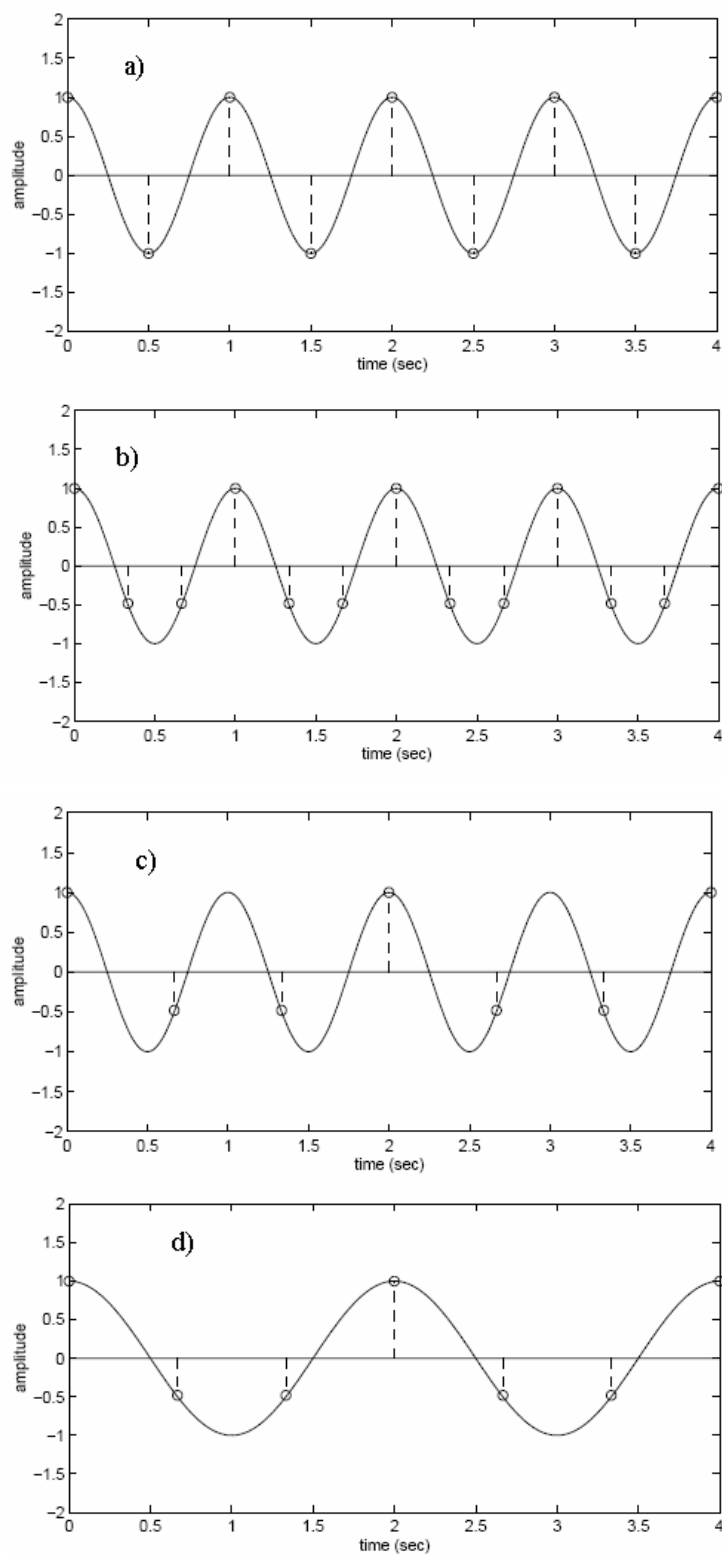
1.2.6 Zkreslení signálu

1.2.6.1 Aliasing

Slovo „aliasing“ znamená v českém jazyce falšování a přesně popisuje jev, který vzniká při nedodržení Nyquistova (Shannon-Kotělnikova) vzorkovacího teorému. Tedy, že nebylo dodrženo vzorkování alespoň dvojnásobnou frekvencí než je nevyšší frekvence obsažená v původním signálu. Na Obr.7a je naznačeno správné vzorkování podle vzorkovacího teorému. Spojitá sinusovka představuje původní signál, body označené kroužkem pak jednotlivé vzorky. Na Obr.7b je vzorkování též v pořádku a ještě postačuje k obnovení signálu. Naproti tomu Obr.7c nesplňuje vzorkovací teorém, pak obnovený signál (Obr.7d) ze vzorků naprosto neodpovídá původnímu. Objevují se nové frekvence, které v původním signálu nebyly. Skutečná informace ze signálu je nevratně ztracena. Po převedení do frekvenční oblasti by bylo zjištěno, že si spektra také neodpovídají.

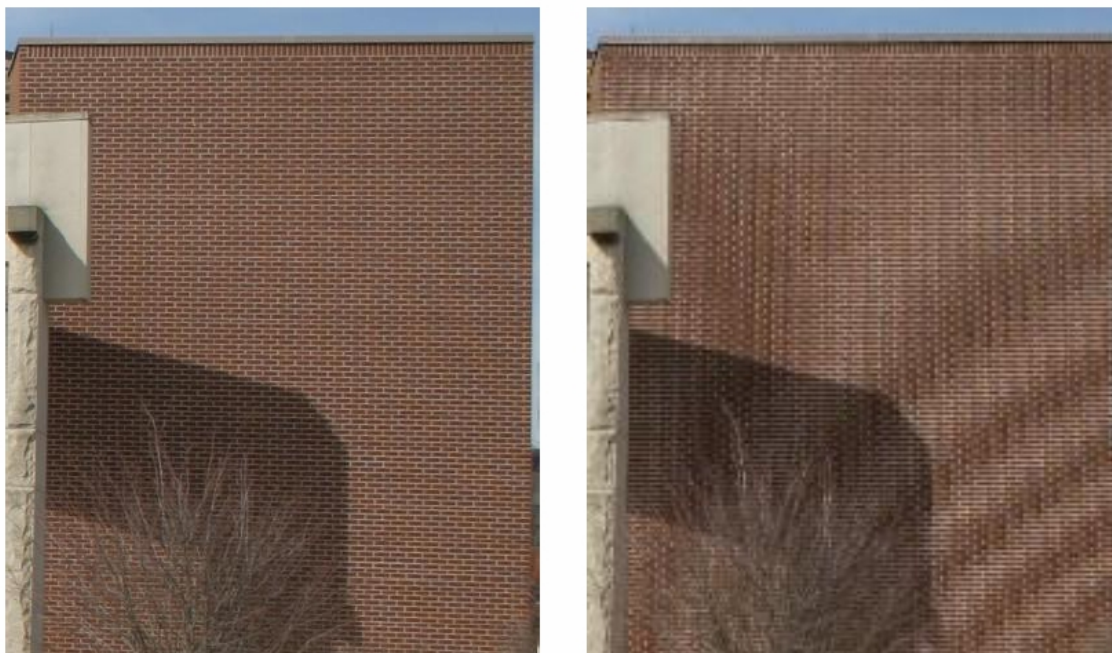
Aliasingu lze zabránit obecně dvěma způsoby, které se většinou vzájemně doplňují. Jednak vzorkováním dostatečně vysokou vzorkovací frekvencí, která je určena Nyquistovým vzorkovacím teorémem, případně převzorkováním, a nebo omezením složek signálu s většími frekvencemi než je polovina vzorkovací frekvence. Omezení se provádí pomocí antialiasingových filtrů, které

jsou v ideálním případě dolní propusti obdélníkového tvaru. Jiným přístupem je převedení signálu do spektrální oblasti a omezení spektrálních složek vyšších frekvencí například vhodným okénkem.



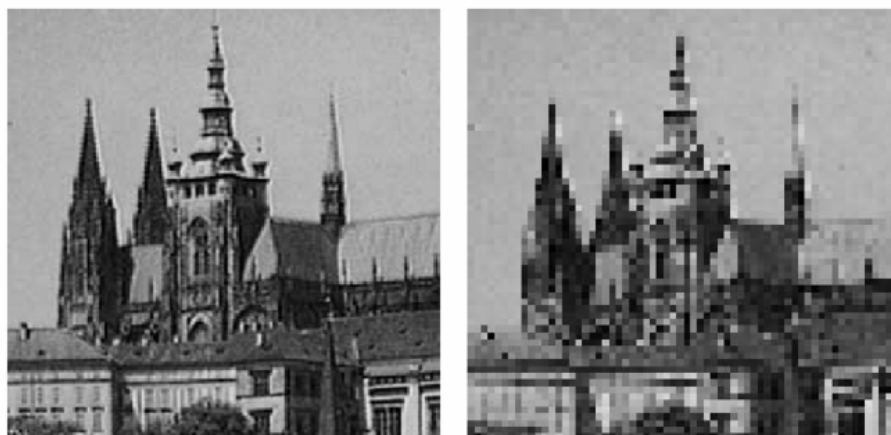
Obr.7: Správné (a,b) a nesprávné(c,d) vzorkování signálu [12]

V digitalizovaných obrazech se chyby ve vzorkování projevují výskytem artefaktů jako je například moire efekt. Vznik těchto jevů je dán prostorovou rozlišovací schopností snímacích prvků, tedy průmětem mozaiky detektorů do předmětové roviny a strukturou snímané scény resp. prostorovou frekvencí textury. Obr.8 zobrazuje moire efekt na fotografii textury cihlové zdi rodinného domu. Vzniklé nové frekvence se projeví jako souvislé pruhy.



Obr.8: Ukázka moire efektu při snímání textury

Jiným a zcela zásadním zkreslením je ztráta detailů zobrazované scény resp. ztráta vysokých frekvencí. To je dáno prostorovou rozlišovací schopností snímacího prvku a nejmenšími detaily primárního parametrického pole, které jsou třeba zobrazit [5]. Tento jev se dá nejlépe pozorovat na modelových scénách bodové změny parametrického pole, například navzájem na sebe navazujících bodů – linie (čára, řada) případně plošného zdroje rozhraní změny [5]. Při nedostatečném rozlišení zobrazovacího systému je ztracena informace o hranách, které představují nejvyšší frekvence, a detailech primárního parametrického pole. Ukázka zkreslení nedostatečným prostorovým rozlišením je na Obr. 9. Tomuto jevu lze předejít pouze užitím dostatečného rozlišení detektoru resp. hustotou mozaiky detektorů, případně potlačením vysokých frekvencí filtrací antialiasingovým filtrem, kde ale hrozí ztráta informace již při filtraci.



Originál 256 × 256

64 × 64

Obr.9 Ukázka zkreslení nedostatečným prostorovým rozlišením

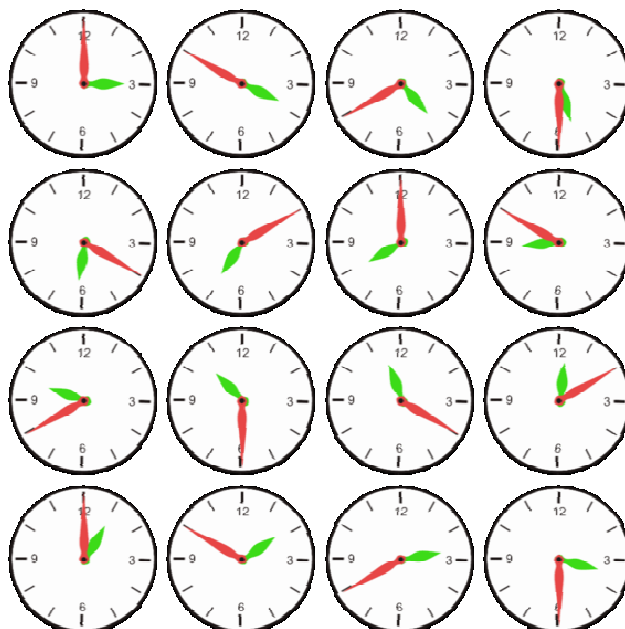
1.2.6.2 Efekt loukoťového kola

Jedná se o jev resp. optický klam neodpovídající skutečnosti, který může být pozorován např. na filmovém záznamu rychle se otáčejícího předmětu např. vrtule letadla. Pozorovatel předpokládá, že vrtule právě vzlétajícího letadla bude mít rychlost několik tisíc otáček za minutu, ale ze záznamu byla vidět jen velmi pomalu se otáčející vrtule. Dalším příkladem může být sledování nebo záznam rotačního pohybu litých kol automobilu nebo vlaku. Odtud se tento jev v angličtině nazývá „wagon wheel effect“. V českém jazyce je jev známější jako efekt loukoťového kola. Kola se v jistém okamžiku ze zdánlivě nepochopitelného důvodu zpomalí, zastaví nebo se dokonce začnou otáčet proti smyslu rotace. Jedná se o optický klam, který je způsoben aliasingem, při nedodržení podmínek korektního časového vzorkování obrazového toku. Při přímém sledování rotujícího předmětu je jev způsoben nedokonalostí lidského oka, především jeho setrvačnými vlastnostmi. Tato nedokonalost však umožňuje vnímání rychle za sebou jdoucích snímků ve filmu jako spojitý obraz. Též se využívá ke kompresi dat, kde jsou z obrazu vyjmuty data z hlediska vnímání člověkem redundantní.

Efekt může být vysvětlen na příkladu stroboskopu. Jako model poslouží scéna, kde rotuje předmět určitou úhlovou rychlostí např. 60 otáček za sekundu. Pro jednoduchost například rotující kotouč, který má vyznačený poloměr. Stroboskopické světlo se nastaví také na 60 záblesků za sekundu. Stroboskop bude osvětlovat scénu pouze v momentě záblesku, jinak ji nebude vidět. Jelikož jsou frekvence, jak rotující scény tak stroboskopu stejné, stroboskop vždy osvětlí scénu při průchodu stejným místem. Bude se zdát, že se scéna vůbec nepohybuje. Pokud bude frekvence stroboskopu snížena na 59 otáček za minutu, stroboskop osvětlí úsečku poloměru vždy o něco později, kotouč urazí delší dráhu a bude se zdát, že se otáčí ve smyslu rotace velmi

pomalou. Zvýší-li se frekvence na 61 otáček, pak bude kotouč osvětlený o něco dříve a kotouč se bude otáčet velmi pomalu proti smyslu rotace.

Ještě lépe se dá vysvětlit tento jev pomocí obyčejných hodin, které by mohly být snímány například kamerou. Když bude brána v úvahu pouze hodinová a minutová ručička, pak bude postačující, udělat snímek dvakrát za hodinu, aby vzorkování bylo korektní. Pro přesné určení polohy ručičky by bylo třeba dodržení vzorkovacího teorému, ale pro jednoduchost je minutové vzorkování postačující. Bude-li se snímat například po 10 minutách, bude smysl otáčení obou ručiček stále správný. Na minutovou ručičku připadne 6 snímků na jednu otáčku a bude se pohybovat pouze po velkých skocích. Na hodinovou ručičku připadne 72 snímků. Při vzorkování po 60 minutách, se bude pohybovat pouze hodinová ručička a minutová bude zdánlivě stát. Obr.10 ukazuje vzorkování hodin po 50 minutách. Malá (hodinová) ručička se bude pohybovat normálně, i když po skocích, na ni připadne 15 snímků na jednu otáčku, na minutovou pak připadne pouze 1 snímek za otáčku. To odporuje vzorkovacímu teorému a nám se bude zdát, že se otáčí v opačném smyslu.



Obr.10: Snímání hodin po 50 minutách [14]

Tomuto jevu se dá zabránit pouze dostatečnou časovou vzorkovací frekvencí tedy časovým rozlišením zobrazovacího systému. Pro lidský zrak je vhodná frekvence přibližně 20-30 snímků za sekundu, kdy se jeví obraz jako spojitý. Větší frekvence jsou zbytečné, kvůli setrvačnosti lidského zraku. Nižší frekvence snímání jsou vnímány jako trhané a nespojité. Časová rozlišovací schopnost zraku se může u každého člověka lišit a je známo, že je závislá i na věku jedince.

Při akvizici např. medicínských dat je kladen důraz především na přesnost interpretace dynamického vývoje scény v čase. Je naprosto nepřijatelné, aby špatné vzorkování v čase zkreslovalo úsudek lékaře a vyvolalo špatnou diagnózu nebo nesprávný postup např. při operaci. Proto se v lékařství používá technika, která je svou akvizicí v čase dostatečná, ale

většinou přesahuje možnosti vnímání lidským zrakem. Není to známkou luxusu nebo plýtvání, ale zejména z důvodu postprocesingu, kdy si lékař může podrobně prohlédnout snímek po snímku vývoj sledovaného objektu v čase, aniž by mu unikly některé detaily, které by nebyly pomalým vzorkováním zachyceny.

Stroboskopický jev se objevuje v mnoha technických oblastech. Příkladem mohou být obráběcí stroje, kotoučové pily a různé jiné nástroje na elektrický pohon založené na rotačním pohybu. Na pracovištích se často používá zářivkové světlo, které je napájecí sítí synchronizováno se stroji. Pokud jsou na stejné fázi a jejich frekvence se vzájemně přibližují, může se rotující stroj, díky stroboskopickému efektu, zdát jako nehybný nebo vypnutý a pracovník může při manipulaci se strojem přijít k úrazu. Stroboskopický efekt nemá jen negativní stránky. Hojně se používá v automobilové technice jako metoda při seřizování předstihu spalovacího motoru apod. Taktéž v zábavním průmyslu se osvětlování stroboskopy využívá k nasvícení tanečního parketu. Při pohledu na takovou scénu se pohyby tancujících lidí jeví jako velmi rychlé, trhané a tím vytváří zajímavé efekty.

1.2.6.3 Pohybová neostrost

Časová rozlišovací schopnost systému popisuje, jak se systém dokáže vypořádat s rychlými změnami ve scéně. Tedy jak věrně dokáže reprodukovat dynamické změny. Jak již bylo zmíněno výše, základním parametrem je obrazová frekvence, neboli počet sejmutých polí za jednotku času. Je to velmi významný parametr, nikoliv jediný. Zde jsme uvažovali konstantní aperturu a to dostatečně krátkou, na to, aby nedošlo ke změně ve scéně. Pokud by tomu tak nebylo tyto změny by se projevíly jako zkreslení obrazu. Toto zkreslení je označováno jako pohybové zkreslení resp. pohybová neostrost. Jde o ztrátu prostorového rozlišení ve směru pohybu [2]. Toto lze stanovit pomocí bodového resp. čárového zdroje, který se pohybuje, a šířky vzniklé impulsní charakteristiky v polovině její výšky $FWHM_{poh}$. K vyjádření prostorového rozlišení výsledného obrazu se používá několik vztahů Ter-pagissian (1.12), Seeman (1.13), Klasen (1.14):

$$FWHM_{total} = FWHM + FWHM_{poh} , \quad (1.12)$$

$$FWHM_{total} = \sqrt{(FWHM)^2 + (FWHM_{poh})^2} , \quad (1.13)$$

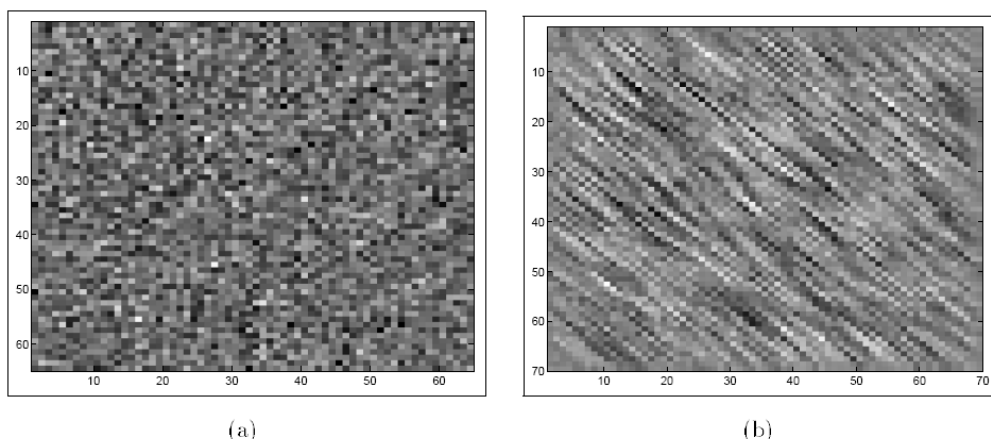
$$FWHM_{total} = \sqrt[3]{(FWHM)^3 + (FWHM_{poh})^3} . \quad (1.14)$$

Expoziční čas resp. časová apertura jakéhokoliv zobrazovacího systému není nulová a ani se nule limitně neblíží. To znamená, že časová apertura je dostatečně dlouhá, aby se objekt ve scéně během snímání posunul z jednoho

bodů do druhého. Směr a velikost je dána vektorem pohybu \mathbf{V} . Na každém bodu se tedy podílí několik bodů scény, které jsou sejmuty během expoziční doby a každý z nich se podílí na výsledném jasu bodu v obraze. Během doby snímání t_a bod urazil určitou vzdálenost k bodů v obraze s jasnem ($C_1 \dots C_k$). Výsledný jas bodu resp. pixelu můžeme vyjádřit jako [3]

$$P(i, j) = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k C_l. \quad (1.15)$$

Výsledek pohybové neostrosti je zřejmý z Obr.11, kde byl vygenerován náhodný šumový obraz a následně zkreslen pohybovou neostrostí ve směru 315° .



Obr.11: Náhodně vygenerovaný šumový obraz a jeho následné rozmazání [9]

Matematicky je možné pohybovou neostrost popsat jako konvoluci

$$b(x, y) = i(x, y) * h(x, y), \quad (1.16)$$

kde i je teoretický obraz sejmutý s nulovou aperturou, b je reálný rozmazaný obraz a h je PSF (Point Spread Function) zkreslujícího systému. Tato zkreslující funkce je dána úhlem α a délkou $\mathbf{d} = \mathbf{V} \times \mathbf{t}$, která vyjadřuje kolik bodů resp. pixelů scény bude ovlivňovat výsledný pixel obrazu. PSF systému je popsána jako

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{d}, 0 \leq |x| \leq d \cdot \cos \alpha, y = \sin \alpha \cdot d \\ 0, jinde \end{cases}. \quad (1.17)$$

Zkreslení pohybovou neostrostí nemusí být způsobeno jen pohybem objektů ve scéně, ale i pohybem snímáče vůči scéně. Pohyb ve scéně a pohyb snímáče resp. jejich pohybové vektory se vzájemně sčítají a oba mají vliv na výsledný vektor a úhel zkreslení, tedy na celou zkreslující funkci h . Touto problematikou se velmi podrobně zabývá práce [3], kde je popsána problematika pohybové neostrosti a algoritmů její analýzy.

2 Model vzorkování obrazového toku

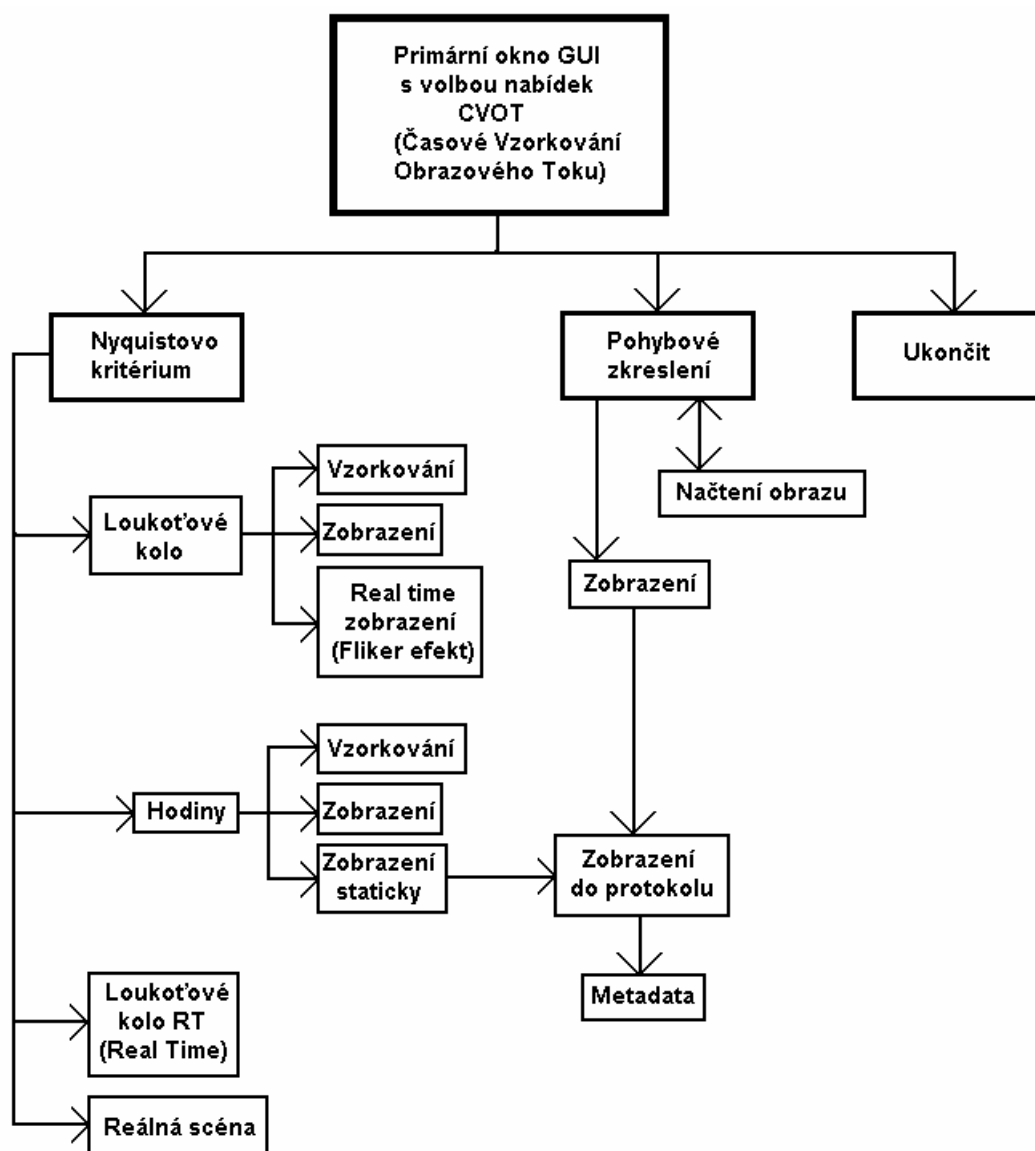
V rámci této diplomové práce byl vytvořen program laboratorní úlohy pro modelování časového vzorkování obrazového toku zaměřený na zkreslení, ke kterému dochází při akvizici obrazových dat. Vlastní program měl být vytvořen v programovacím jazyku Matlab.

Z uživatelského hlediska je příjemnější použití interaktivních oken s nabídkami nežli skripty, které se musí jednotlivě spouštět v rootu (příkazovém řádku) programu Matlab. Zadávání konstant je také pohodlnější přímo v okně, kde bude probíhat vlastní modelování či zobrazení. Proto je celý program navržen v prostředí GUI (Graphical User Interface) Matlabu, který poskytuje základní kontextové nabídky, základní ovládací prvky, jako jsou tlačítka, textové pole, posuvníky apod.

Program navržený pro laboratorní výuku zabývající se zobrazovacími systémy je zaměřen, po dohodě s vedoucím práce, na ověření vzorkovacího (Nyquistova) teorému v časové akvizici obrazových dat. Dále ověřuje zkreslení způsobené nedostatečnou rychlostí akvizice, případně špatně zvolenou aperturou vzhledem k dynamickému vývoji ve scéně -zkreslení pohybovou neostrotí.

Celá struktura programu je koncipována tak, aby byla jednoduchá a přehledná. Ovládání je intuitivní a není třeba podrobný manuál ke zvládnutí programu. Okna jednotlivých částí programu vždy obsahují malou nápovědu, která by měla být postačující k nastavení všech prvků a konstant pro simulaci jevů. Přihlédnuto bylo i k časové náročnosti laboratorního cvičení a je vyzkoušeno, že simulace všech jevů má v rámci jednoho laboratorního cvičení dostatečné rezervy. Proto je možné spojit úlohu simulace vzorkování obrazového toku s jinými úlohami. Tímto lze obohatit výuku zabývající se zobrazovacími systémy o další názorné ukázky, které byly zpracovány v rámci jiných prací, případně doplnit výuku o podrobnější teoretický rozbor úlohy.

Globální schéma vytvořeného programu je zobrazeno na Obr.12. Primárně je rozděleno do dvou částí. První se zabývá modelováním jevů, které provázejí akvizici obrazových dat při nedostatečném vzorkovacím kmitočtu – ověření Nyquistova kritéria vzorkování. Ta se skládá ze čtyřech podprogramů (model loukoťového kola, model hodin, interaktivní model loukoťového kola, model reálné scény), které v podstatě simulují stejný jev ovšem vždy jinou technikou nebo odlišným modelem. Druhá část se zabývá modelováním pohybového zkreslení.



Obr.12 Globální schéma programu pro modelování vzorkování obrazového toku

Samotné spuštění se provádí pomocí volání základního GUI uloženého v m-file souboru CVOT.m (zkratka Časové Vzorkování Obrazového Tok). Po spuštění se zobrazí okno programu s kontextovými nabídkami na horní liště. Okno samo o sobě nemá jinou funkci než tvořit rozcestník k jednotlivým podprogramům. Výběr simulace se provádí pomocí již zmíněných kontextových nabídek pomocí myši. Po kliknutí na nabídku se roztáhne kompletní nabídka pro jednotlivé jevy. Ukončení programu je možné pomocí standardního křížku v pravém horním rohu, či minimalizaci okna. Pro zavření programu však není doporučen tento způsob jelikož by v paměti mohly zůstat neukončené úlohy popřípadě proměnné, které by mohly způsobit potíže při opětovném volání programu apod. K tomuto slouží nabídka „Ukončit“, která uzavře všechny okna podprogramů a hlavního programu. Tomu předchází vymazání proměnných. Pozadí okna lze změnit pouze náhradou souboru backg.jpg jiným s totožným názvem, pokud by nevyhovovalo, případně bylo požadováno doplnění o nějaké informace. Hlavní okno programu je na Obr.13.



Obr.13 Primární okno programu CVOT.m

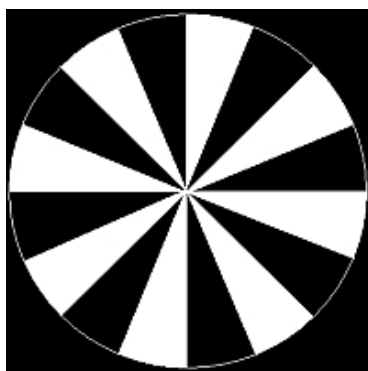
2.1 Model ověření Nyquistova teorému

V lékařských zobrazovacích systémech je základním požadavkem věrný záznam případně reprodukce zobrazované scény, tedy primárního parametrického pole, ale i jeho dynamického vývoje. Především specializované obory lékařství jako je kardiografie, která registruje funkci srdce, nebo angiografie, zobrazující průtok krve případně kontrastních látek cévami, a jiné obory zabývající se zobrazováním dynamických změn scény, kladou velmi vysoké nároky na časovou akvizici. Je naprosto nepřipustné, aby nesprávná akvizice vedla k nesprávnému vyhodnocení situace nebo chybné diagnóze. Z toho plyne velká zodpovědnost inženýrů a specialistů při návrhu a konstrukci zobrazovacích zařízení. Každý zobrazovací systém je uzpůsoben své funkci a musí splňovat přísná kritéria.

Pro věrné zachycení dynamického vývoje scény v čase je stěžejní volba dostatečné vzorkovací frekvence. Úloha správné resp. špatné volby vzorkovací frekvence je simulována na třech modelech scény – terč představující zjednodušený model loukoťového kola, model hodin a nafilmovaná reálná scéna.

2.1.1 Model efektu loukoťového kola

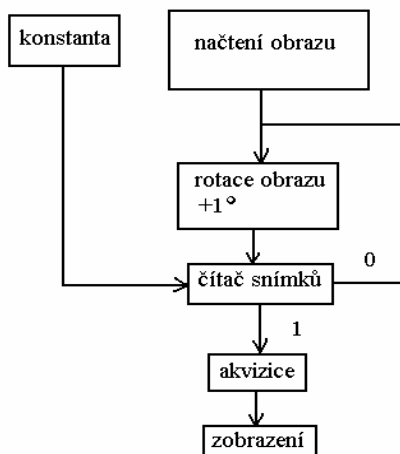
Základní myšlenkou tohoto modelu je využití rotačně-symetrického objektu, který představuje primární parametrické pole. Rotující objekt pak představuje dynamický vývoj scény v čase. Základní frekvence scény je dána rozdělením kotouče na rovnoměrně střídající se černé a bílé části. V modelu je použit kotouč se 16-ti segmenty, kde připadá na jeden segment úhel 22,5 stupňů. Frekvence obrazu je tedy 45 stupňů za časovou jednotku, jelikož se bere jako určující střídání kontrastu obrazu. Použitý model je na obrázku Obr.14.



Obr.14 Rotačně-symetrický obraz-model loukoťového kola

2.1.1.1 Konstrukce programu louk.m

Blokový diagram modelu loukoťového kola je na Obr.15. Zde najdeme blok načtení rastrového obrázku do paměti, dále je načtena konstanta vyjadřující vzorkovací úhlový kmitočet, resp. o jaký úhel se scéna pootočí než je pořízen jeden vzorek. Obraz poté rotuje vždy o jeden stupeň a zároveň se inkrementuje hodnota čítače, který ji porovnává s hodnotou vzorkovacího úhlového kmitočtu. Pokud se obě konstanty rovnají provede akvizici snímku, tj. uloží ji do strukturované matice. Po dokončení celého vzorkování je možné navzorkovaný vývoj scény zobrazit pomocí skriptu movie.m již předprogramovaném v Matlabu.

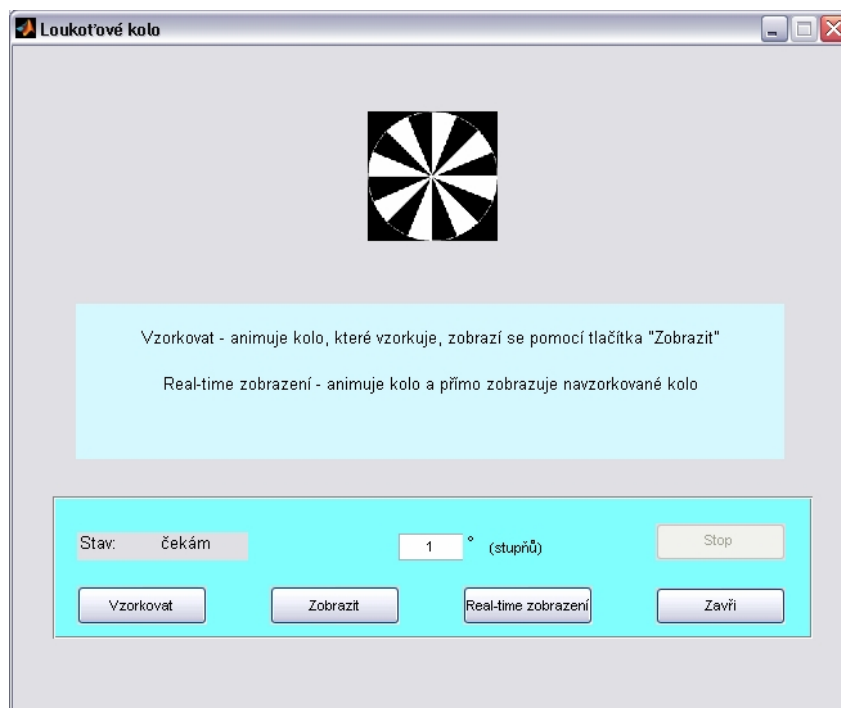


Obr.15 Blokové schéma skriptu louk.m

Časová jednotka vzorkování při akvizici scény není přesně stanovena, především proto, že rychlost otáčení závisí na rychlosti zpracování programu hardwarovými prostředky, na kterých je spuštěn a může se lišit na různých počítačích a také záviset na počtu právě spuštěných úloh. Při zobrazování navzorkovaného signálu je pevně nastaven počet snímků na 5 za sekundu. Tato hodnota byla zjištěna experimentálně jako dostačující. Při vzorkování s velkou konstantou vzorkovacího kmitočtu se úměrně zvýší i rychlost rotace při přehrávání a při vyšším počtu frm/s (okének za sekundu) již vypovídací hodnota záznamu není příliš vysoká.

Dialogové okno podprogramu je na Obr. 16, kde je možné najít základní ovládací tlačítka Vzorkovat, Zobrazit, Stop, Real-time a Zavřít. Dále hlavní zobrazovací okno, řádek manuálního zadávání konstanty ve stupních, zobrazení stavu probíhající operace a stručnou nápovědu.

Konstanta je defaultně nastavena na 1 stupeň, tzn. na jednu změnu resp. pootočení obrazu o jeden stupeň, připadá jeden vzorek. Jedná se tedy o vysoké převzorkování. V závislosti na použitém počtu vzorků se úměrně prodlužuje jak doba vzorkování, tak i délka zobrazení. Proto je vhodné nejdříve nastavit vzorkování např. na 15 stupňů, kde připadají na změnu ve scéně 3 vzorky. Po stisknutí tlačítka vzorkovat začne samotná akvizice. Terč se začne otáčet a signalizace „Vzorkuji“ s červeným podkladem ukazuje, ve který okamžik je pořízen vzorek. Pomocí tlačítka „Stop“ se vzorkování zastaví. Pro přehrání záznamu slouží tlačítko „Zobrazit“. Přehrávání začne ve stejném okně jako byly pořizovány vzorky. Zde použití „Stop“ není možné jelikož se provádí přehrávání záznamu pomocí externího skriptu a přerušení lze provést jen pomocí stisku kláves CTRL+C, který „násilně“ přeruší běh všech prováděných operací.



Obr. 16 Dialogové okno podprogramu louk.m

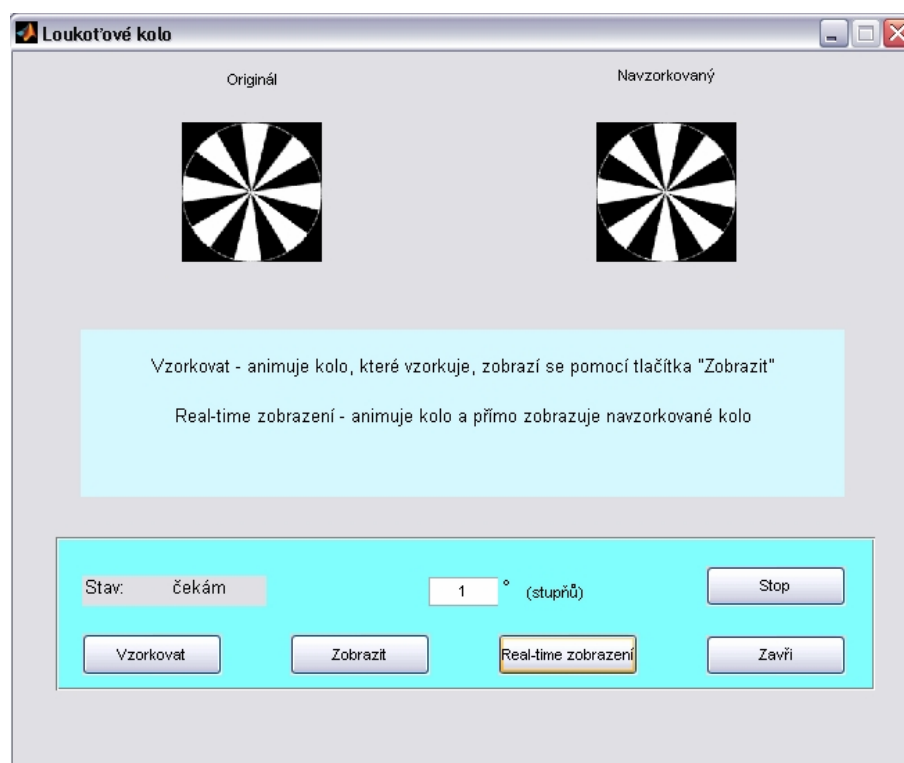
Velikost zobrazované scény byla zvolena s přihlédnutím na výpočetní náročnost prováděných operací při otáčení. Zvolenou scénu je možné zaměnit za jinou, například fotografii reálného loukoťového kola, či litého kola automobilu apod. Předpoklad je pouze v rotační symetričnosti podle středu obrazu a dále je doporučený černý podklad. Obrázek modelu je uložen v souboru `loukote2.jpg` a má rozměry 100x100 pixelů.

Při konstrukci programu se vyskytly dvě komplikace. První se týkala otáčení obrazu. Při použití příkazu `imrotate` probíhá přepočítávání polohy jednotlivých pixelů, aproximaci a následné filtraci blíže neurčeným filtrem. Při několikanásobném opakování těchto operací docházelo ke značným zkreslením, tvorbou artefaktů kolem středu a výrazné ztrátě prostorového rozlišení. Tento problém byl vyřešen rotací vždy originálního obrazu o inkrementovanou velikost úhlu nikoliv dalším otočením předchozího výsledku rotace obrazu. Takto ošetřený výsledek byl již uspokojivý. Druhou chybou, která se vyskytla, je několikanásobné přehrávání záznamu. Při použití příkazu `movie` se nejdříve načítá strukturovaná matice snímku a poté se zobrazuje se zadanými parametry, jako je počet snímků za sekundu a počet opakování záznamu. Při načítání dat je bohužel díky interní chybě skriptu `movie.m` předprogramovaného v Matlabu způsobeno dvojí přehrávání záznamu, kde první je provedeno maximální rychlostí zřejmě danou maximálním výpočetním výkonem hardwaru, druhé pak již probíhá korektně vzhledem k nastaveným parametrům. Na tento problém narazili i autoři práce [11], kde byla simulována podobná úloha pro použití v aplikaci pro vyšetření neurovizuálních projevů. Zde ji nedokázali vyřešit. Tento problém byl konzultován s technickou podporou firmy Mathworks, která potvrdila interní chybu skriptu a sdělila, že momentálně není oprava tohoto toolboxu středem zájmu, ale je možné se jí dočkat

v novějších verzích programu Matlab. Proto prozatím nezbyvá nic jiného, než chybu ignorovat.

2.1.1.2 Zobrazení v reálném čase s flicker efektem

Částí tohoto podprogramu je zobrazení v reálném čase. Tato simulace probíhá ve stejném dialogovém okně jako program původní. Zde jsou dvě zobrazovací části. Na první probíhá zobrazování originální (snímané) scény, ve druhé pak její vzorkovaná scéna. Rozdíl oproti předchozímu případu je v tom, že zobrazování probíhá v obou oknech současně. Zobrazování je přímé v reálném čase a bez záznamu. Z toho vyplývá zpomalení frekvence otáčení vzhledem k frekvenci otáčení originálu důsledkem výběru pouze určitých okamžiků dynamického vývoje. Vzniká výrazný flicker efekt. Tento jev je způsoben nízkým počtem okének za jednotku času. Zobrazování není spojité. Odstranit tento jev by bylo možné pouze velmi velkou rychlostí rotace originálu. Tohoto v prostředí Matlabu není možné dosáhnout vzhledem k náročným výpočtům, které jsou potřeba. Dialogové okno části programu pro zobrazení v reálném čase je na Obr. 17. Zde se nacházejí stejné ovládací prvky jako v předchozím případě. Jelikož nebyl použit záznam snímků a následné přehrání záznamu pomocí příkazu *movie*, je možné běh programu kdykoliv přerušit pomocí tlačítka „Stop“. Po spuštění je skript vykonáván do té doby, kdy je manuálně ukončen uživatelem. Zavření okna je možné opět pomocí tlačítka „Zavřít“, nebo křížkem v pravém horním rohu.



Obr.17 Dialogové okno pro zobrazování v reálném čase skriptu louk.m

2.1.1.3 Výsledky simulací

Úloha měla simulovat vznik aliasingu při nedostatečném vzorkování. Při experimentování s úlohou bylo ověřeno, že nedodržením vzorkovacího teorému, v tomto případě dvou vzorků na 45° , dojde ke zkreslení signálu a tím ztratě informace.

Při vzorkování po nejvýše 22° se ještě aliasing neprojeví, ovšem ze subjektivního hlediska už signál zkreslen je. Díky setrvačnosti lidského oka se při blížícím se porušení podmínek vzorkování může zdát, že se kotouč střídavě otáčí ve smyslu a protismyslu rotace. Takový signál již postrádá informativní charakter. Při vzorkování po větších úhlech otáčení se aliasing projeví rotací v opačném smyslu oproti originálu a tím rychleji čím větší je hodnota vzorkovacího úhlu. V jistém okamžiku, kdy hodnota dosáhne vzorkování po 45° , což je samotná základní frekvence modelu, se obraz zdánlivě zastaví. To je způsobeno sejmutím vzorku vždy v době průchodu stejného kontrastu.

Zcela záměrně není obraz geometricky homogenní, obsahuje mírné odchylky od přesného modelu. Ve chvíli, kdy se rotace zdánlivě zastaví, by se záznam jevil jako statický obraz. Díky geometrickým odchylkám se začne obraz jakoby „vrtět“. Pak je získán dojem, že přehrávání záznamu stále pokračuje.

Zobrazení v reálném čase s flicker efektem má naprosto stejné výsledky. Rozdíl je pouze ve formě zobrazení. Zde je jasně vidět, ve kterou chvíli je pořízen vzorek a jak dlouho se musí čekat na další, resp. jak dlouhou dráhu musí urazit myšlený bod, než je zachycen záznam.

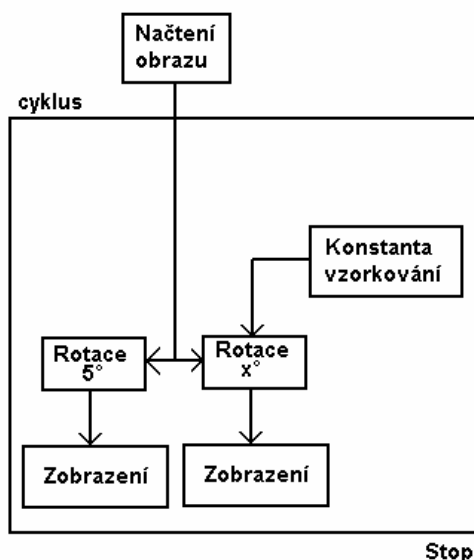
Jelikož tento program má být součástí laboratorního cvičení, je vhodné učinit nějaký záznam o provedené simulaci. Základní idea byla staticky zachytit jednotlivé vzorky do matice obrazů a tím vytvořit posloupnost. Další myšlenkou bylo zobrazení vzorků za sebou a vytvoření tak pomyslného filmového pásu. Oba pokusy se ukázaly jako nepoužitelné. Vzhledem k počtu vzorků by byl filmový pás neúměrně dlouhý. Také díky charakteru modelové scény, kde se pouze střídají černé a bílé úseče se zobrazení filmovým pásem stalo nepřehledné a matoucí. Proto od statického zobrazení a následného uložení, například do protokolu ze cvičení, bylo upuštěno.

2.1.2 Model efektu loukot'ového kola v reálném čase

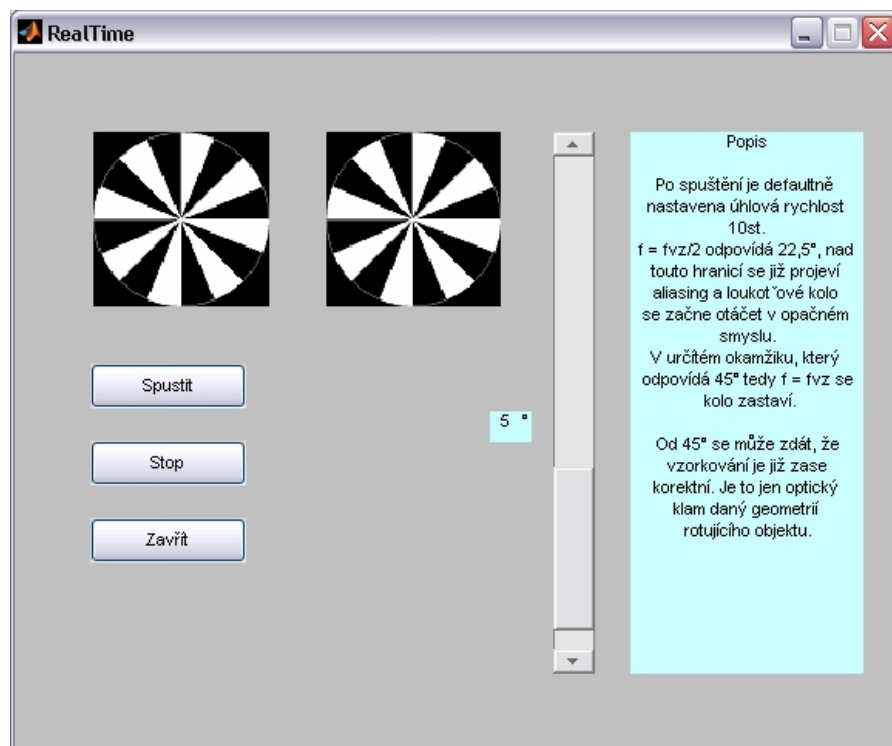
Zde je použit stejný model jako v předchozím případě. Vzorkování a zobrazování je však odlišné. Ve svém důsledku se nejedná o vzorkování nýbrž o korektní resp. nekorektní zobrazování scény v závislosti na úhlu otáčení. Mechanismus zobrazování vysvětlen dále v textu.

2.1.2.1 Konstrukce programu Real-time.m

Po spuštění programu se zobrazí dialogové okno se standardními tlačítky „Spustit“, „Stop“ a „Zavřít“. Jsou zde dvě zobrazovací oblasti. V první je zobrazována kontrolní scéna, která se otáčí konstantní rychlostí o úhel 5° . Ve druhé se zobrazuje ovlivňovaná scéna vzorkovací konstantou. Funkce programu je zřejmá z blokového diagramu (Obr.18). Po načtení obrazu program čeká na stisk tlačítka „Start“. Stiskem se začne vykonávat cyklus, v každém svém kroku nejprve otočí referenční obraz a poté načte konstantu z posuvníku a právě o tuto konstantu obraz otočí a zobrazí ve druhém poli. Tento jednoduchý princip umožňuje interaktivně měnit úhel otáčení obrazu při chodu programu a tím plynule procházet od korektního zobrazení k nekorektnímu. Cyklus se stále opakuje, dokud není stisknuto tlačítko „Stop“. Rotace je opět prováděna pomocí příkazu *imrotate*. Statické zobrazení a uložení do protokolu zde taktéž není možné jako v předchozím případě, jelikož se zobrazovaná data nikam neukládají a dále z důvodů popsaných výše.



Obr.18 blokové schéma programu Real-time.m



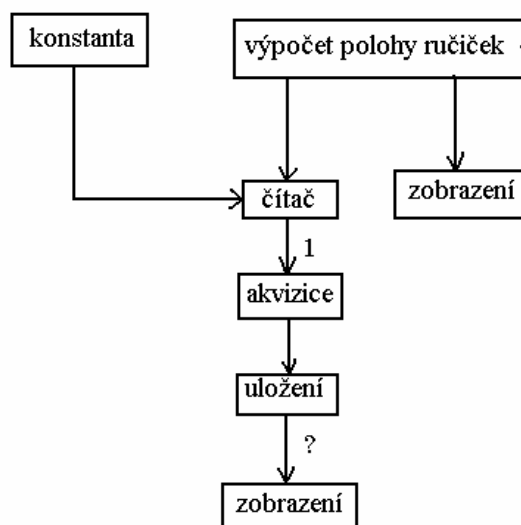
Obr. 19 Dialogové okno programu RealTime.m

2.1.3 Model ručičkových hodin

Tento model se již blíží scéně, kterou může být vypořádována v reálném světě. Pro dobré pochopení jevu studenty je lepší názorná ukázka, kde si jasně uvědomí souvislosti a asociují si modelovanou scénu s reálnou.

2.1.3.1 Konstrukce programu hod.m

Modelová scéna je opět založena na rotačním pohybu. Byl vytvořen model pomocí kružnice se středem korespondující se středem obrazu. Na kružnici byly vyznačeny body představující značky po hodinách resp. pěti minutách. Rotaci provádějí pouze dvě pomyslné kružnice s vyznačeným poloměrem, který představuje hodinovou resp. minutovou ručičku. Rotace je dána konstantou, která udává, po kolika minutách se dynamický vývoj scény bude vzorkovat. V předešlém případě byla rotace založena na otáčení celého obrazu. V tomto případě je použit výpočet vždy nové polohy úseček představujících ručičku hodin a minut. Ze středu a nové polohy koncového bodu ručky je vytvořen vektor, který je následně zobrazen. Stejně jako u reálných hodin je třeba jedné otočky minutové ručičky, aby svou polohu změnila hodinová ručka. Změna je provedena skokem, nikoliv postupně.



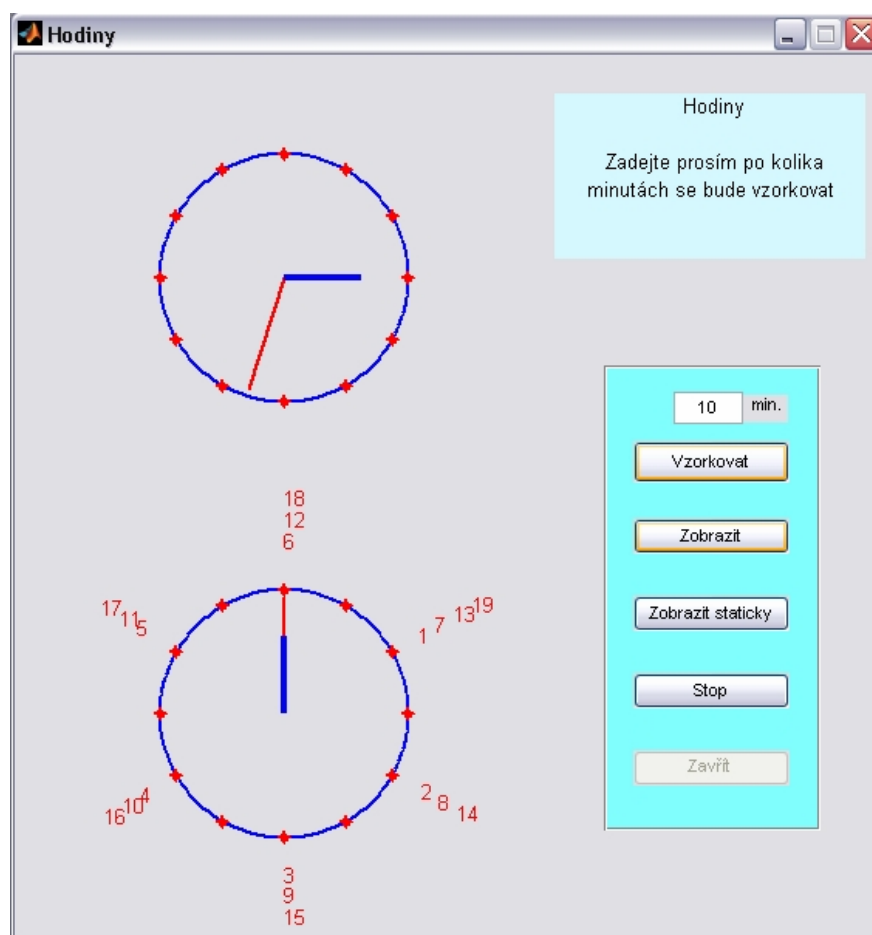
Obr.20 Blokové schéma modelu ručkových hodin

Na Obr.20 je znázorněno blokové schéma podprogramu. V první fázi je přečtena konstanta, která vyjadřuje, po kolika minutách se pořídí další vzorek. Je tedy určující pro vzorkovací frekvenci. Po stisku tlačítka „Vzorkovat“ je cyklicky prováděn výpočet polohy ručiček a následně zobrazován. Postupně se inkrementuje čítač, který při dosažení hodnoty vzorkovací konstanty pořídí záznam obrazu. Celý tento cyklus se opakuje, dokud hodinová ručka nedosáhne 12 hodin. Zobrazování vzorkované scény se děje v horním zobrazovacím poli.

Při vzorkování se též provádí zobrazení posloupnosti jednotlivých vzorků ve spodním zobrazovacím poli jak je vidět na Obr.21. Číslo, které představuje pořadí vzorku je umístěno na okraji kružnice druhého zobrazovacího pole. Vše je ošetřeno, aby se čísla navzájem nepřekrývala a byla dostatečně viditelná. Jelikož se provádí inkrementování polohy čísla kontinuálně, je jejich počet omezen na 20, aby nedošlo k zobrazování mimo určenou plochu a zároveň kvůli přehlednosti. Při probíhající vzorkování je možné zastavit právě prováděné operace pomocí tlačítka „Stop“.

Posloupnost sejmutých obrazů je postupně ukládána do strukturované matice. Po stisku tlačítka „Zobrazit“ jsou data následně zobrazována opět pomocí příkazu *movie* v horním zobrazovacím poli. Zastavení přehrávání není možné tlačítkem „Stop“, ale pouze stlačením CTRL+C.

Tlačítkem „Zobrazit staticky“ se otevře nové dialogové okno, kde jsou vyobrazeny první čtyři vzorky záznamu. Počet zobrazených vzorků je volen záměrně tak malý z důvodu přehlednosti a hlavně čitelnosti. Při větším počtu se obrazy úměrně zmenšily a již nebylo možné určit polohu ručiček. Vypovídací hodnota byla pak téměř nulová.

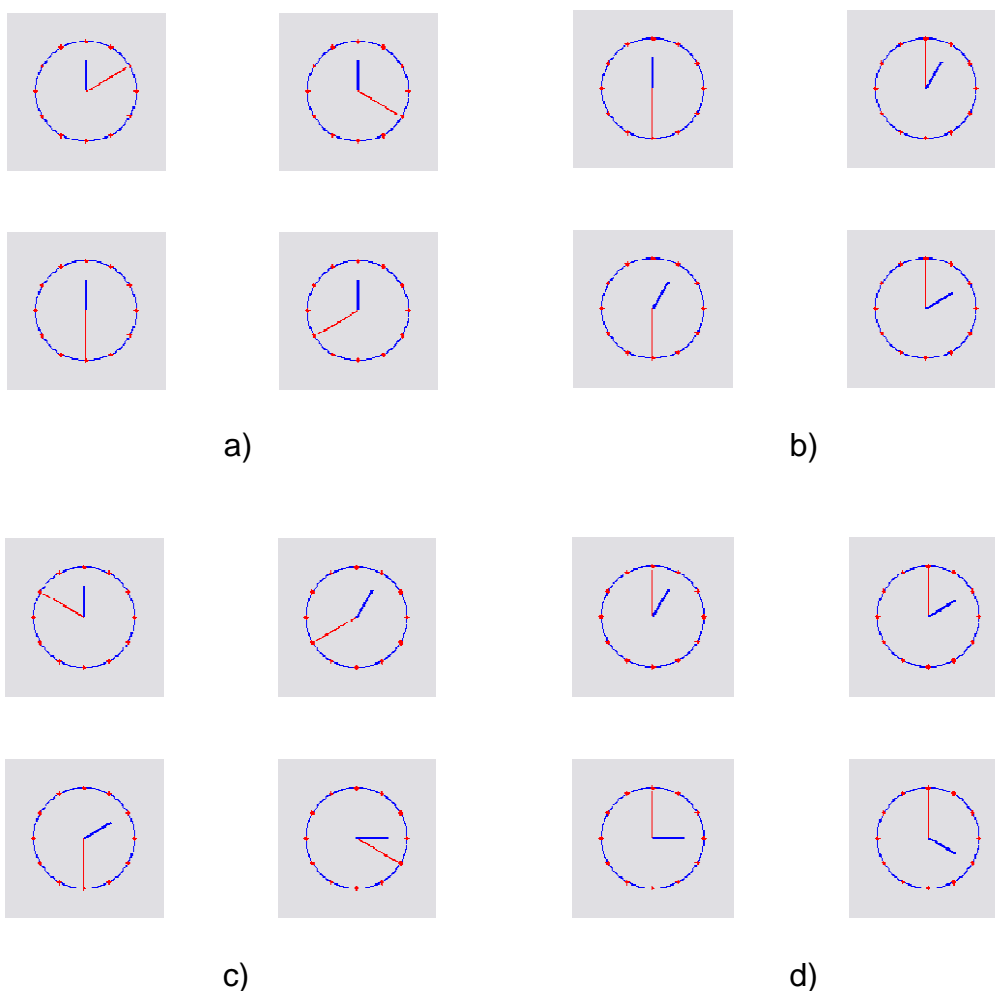


Obr.21 Dialogové okno programu hodiny

2.1.3.2 Výsledky simulací

V modelu vzorkování ručičkových hodin se objevují dvě frekvence. První je frekvence hodinové ručičky, druhá pak pro minutovou ručičku. Pro hodinovou ručku je podle vzorkovacího teorému třeba udělat nejméně dva vzorky za 12 hodin, aby nebyla ztracena informace o pohybu. Minutová ručka potřebuje pro korektní vzorkování alespoň dva vzorky za hodinu. Úkolem je tedy zachytit smysl rotace nikoliv samotné hodnoty minut a hodin. Celá úloha je zaměřena především na vzorkování minutové ručky. Hodinová ručka pouze poskytuje ověření správné funkce a poskytuje dojem měnící se scény.

Experimentem byl ověřen vzorkovací teorém při vzorkování po hodnotách 10min., 30min., 50min. a 60min. Při vzorkování po deseti minutách je akvizice v pořádku a zobrazení korektní. Minutová i hodinová ručička se otáčí ve správném smyslu. Zatímco 30 minutové vzorkování zapříčiní „skákání“ minutové ručky z polohy 6 hodin do polohy 12hod a naopak. Hodinová ručka se pohybuje korektně. Vzorkováním po 50 minutách se projevuje aliasing a minutová ručka se začne pohybovat proti smyslu rotace při korektním pohybu hodinové ručky. Konečně při vzorkování 60-ti minutami, což je základní frekvence minutové ručky, se pohybuje pouze hodinová ručka. Průběh jednotlivých případů je demonstrován na Obr. 22.



Obr.22 Průběhy vzorkování modelu hodin a) po 10-ti min., b) po 30-ti min., c) po 50-ti min., d) po 60-ti min.

2.1.4 Model vzorkování s použitím reálné scény

Tato úloha modeluje časové vzorkování obrazových dat s použitím nafilmované reálné scény. Je sledováno opět korektní zobrazování směru rotačního pohybu scény. Po konzultaci s vedoucím práce a jeho návrzích byl zvolen jako rotační objekt rotoped.

2.1.4.1 Popis experimentu

Scéna byla navržena tak, aby se potlačily rušivé elementy, jako jsou stíny a pozadí. Rotoped byl umístěn před napnuté fotografické plátno bílé barvy a

nasvícen tak, aby se co nejvíce eliminovaly stíny dopadající na plátno. Výsledek sice není dokonalý, ovšem s přihlédnutím na domácí podmínky uspokojivý.

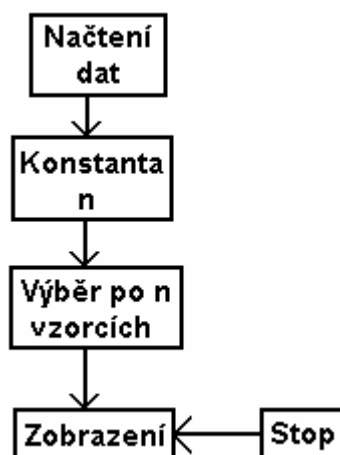
Jelikož nebyla k dispozici digitální filmová kamera, byla scéna nafilmována fotoaparátem FUJIFILM FinePix S9100. Tento fotoaparát poskytuje možnost filmového záznamu v rozlišení 640x480 pixelů při rychlosti 30 snímků za sekundu. Fotoaparát byl upevněn na stativ, který zaručoval konstantní úhel a vzdálenost snímání.

Frekvence šlapání na rotopedu byla stanovena přibližně na jednu otáčku za sekundu a byla udržována pouze rytmem klapání metronomu. Tato technika se zdála postačující a jak se později ukázalo až překvapivě přesná vzhledem k lidskému faktoru, který do procesu vstupoval. I přesto je experiment zatížen nezanedbatelnou chybou. Byl pořízen záznam o délce 5 minut. To odpovídá 9000 snímkům. Přímé načtení video-souboru do pracovního prostředí Matlabu nebylo možné. Matlab sice podporuje videoformát s kompresí divX ve formátu avi, ale bohužel není možné použít jiné kodeky pro dekompresi než již obsažené v Matlabu. Ty nebyly kompatibilní s žádným ze šesti zkoušených formátů a proto se od přímého načtení upustilo. Videozáznam byl tedy převeden na jednotlivá okénka pomocí volně šiřitelného programu AVIedit. Zde se projevil enormní nárůst dat překračující 100MB díky absenci komprese. Obrazy byly zmenšeny na rozlišení 300x225 pixelů, čímž se částečně objem dat zmenšil. Pomocí vytvořeného skriptu `nact_obr.m` byly obrazy načteny do strukturované matice `mvie.mat`.

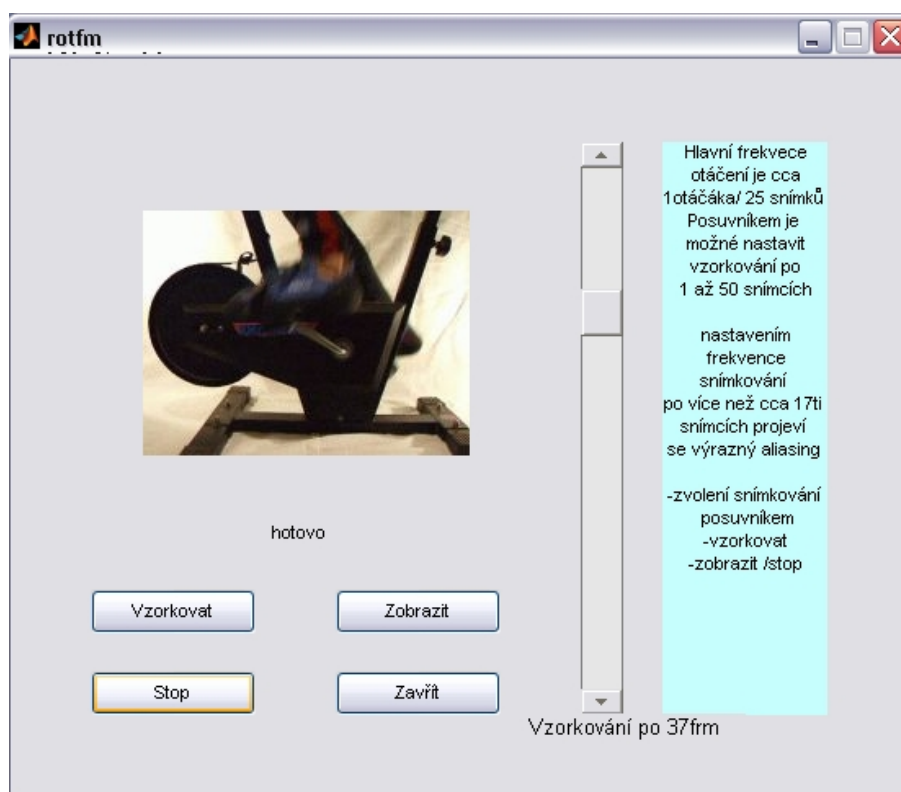
2.1.4.2 Konstrukce programu `rotfm.m`

Po spuštění programu je nejdříve načtena strukturovaná matice s uloženými nevzorkovanými obrazy. Poté je zobrazeno dialogové okno s jednou zobrazovací oblastí a standardní tlačítka „Vzorkovat“, „Zobrazit“, „Zavřít“ a „Stop“. Dále se zde nachází posuvník k výběru počtu snímku, po kterých se bude vzorkovat scéna.

Po zvolení počtu okének a tedy vzorkovací frekvenci následuje vlastní vzorkování stiskem tlačítka „Vzorkovat“ a výběrem jednotlivých okének matice. Jelikož byla strukturovaná matice s obrazy načtena již při startu programu, vzorkování netrvá déle než 5 sekund. Nyní je připraven záznam k přehrávání. To se uskuteční stiskem tlačítka „Zobrazit“. Přehrávání se děje pomocí příkazu `movie` s parametry přehrávání 15frm/s. Tato hodnota byla stanovena experimentálně. Při patnácti okénkách za sekundu se ještě neprojeví flicker efekt a zároveň se neúměrně nezatíží výpočetní výkon hardwaru. Přehrávání je uzavřeno ve smyčce a přeruší se až po stisku „Stop“. Je nutné počkat, než se přehraje celý záznam, protože vykonávání příkazu `movie` je nepřerušitelné kromě použití CTL+C. Blokované schéma je na Obr.23, vlastní dialogové okno programu pak na Obr.24.



Obr. 23 Blokové schéma programu rotfm.m



Obr.24 Dialogové okno programu rotfm.m

2.1.4.3 Výsledky simulací

V této úloze byl sledován korektní resp. nekorektní směr rotace primárního parametrického pole. Ve scéně se vyskytují dvě frekvence. Hlavní a sledovaná je frekvence otáčení šlapadel rotopedu. Druhá je frekvence otáčení třetího kola rotopedu, na kterém je vyznačen bílý bod. Experimentálně bylo ověřeno

vzorkování po 5, 18 a 25 snímcích. Při vzorkování po 5-ti snímcích je vzorkování korektní a taktéž i zobrazení. Vzorkování neodporuje vzorkovacímu teorému, na jednu otáčku šlapadel připadá 5 vzorků. Rychlost otáčení samozřejmě neodpovídá původní rychlosti. Při použití výběru vzorků z původního záznamu je to pochopitelné. Je třeba připomenout, že je vzorkovaná již zcela diskretizovaná scéna co do času a primárního parametru. Bílý bod na brzdícím kole se otáčí protismyslu rotace původního směru. U něj je porušena podmínka vzorkování, protože frekvence je přibližně trojnásobná.

Vzorkováním po 18-ti okénkách se již projevuje značný aliasing a ztrácíme informaci o smyslu rotace. Šlapadla rotopedu se otáčejí v protisměru oproti originálu. V tomto případě je jedna otáčka vždy vzorkována jen jedním okénkem což odporuje vzorkovacímu teorému. Bílý bod brzdícího kola se sice otáčí ve správném smyslu, ale je to bohužel jen optický klam. Vzorkováním je vždy první vzorek pořízen z první otáčky a druhý z druhé otáčky snímku. Tím se zdá, že vzorkování je korektní.

Vzorkováním po 25 snímcích je také porušena vzorkovací podmínka a taktéž dojde ke ztrátě informace. Jelikož jde o vlastní frekvenci scény, vzorek je pořízen vždy ve stejné fázi rotace. Záznam se jakoby zastaví. Zde se projevila chyba nekonstantní rychlosti otáčení vlivem lidského faktoru. Jelikož frekvence scény není přesná, zobrazení záznamu se přímo nezastaví, nýbrž se pomalu pohybuje ve směru a proti směru rotace s malou výchylkou, přičemž se náhodně otočí velkou rychlostí. Pro názornost ukázky aliasingu je to ovšem postačující.

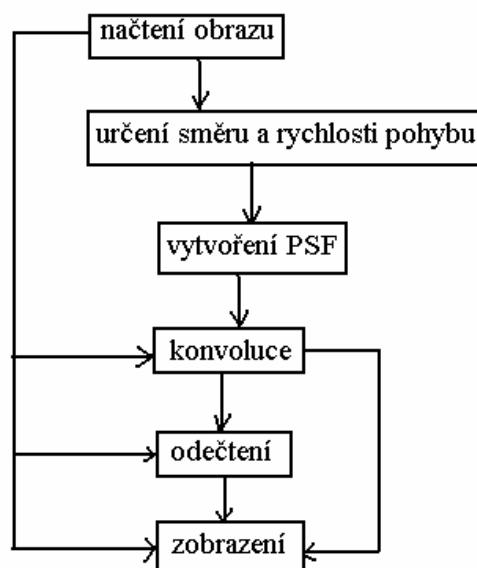
2.2 Model pohybového zkreslení

Tento model má za úkol modelovat zkreslení obrazu při jeho akvizici. Při provádění akvizice řezu obrazovým tokem se vyvíjí scéna spojitě. Tedy v každém časovém intervalu $\Delta t \rightarrow 0$ je scéna změněna. Časová apertura vzorkování se limitně neblíží k nule. Každý bod scény urazí jistou nenulovou dráhu, danou rychlostí vývoje ve scéně, ve směru pohybu. Tento vektor, resp. jeho velikost a úhel svírající se souřadným systémem je pak určující pro PSF, která ovlivní bod a jeho okolí.

2.2.1 Konstrukce programu pohyb.m

Před spuštěním samotného programu modelujícího pohybovou neostrost je potřeba načíst obraz v hlavním výběrovém okně položkou v menu „Pohybové zkreslení“. Program je ošetřen tak, aby nebylo možné spustit program bez načtení obrazu. Po takovém pokusu je zobrazeno varování. Soubor ve tradičních obrázkových formátech je možné načíst z kteréhokoliv místa na disku bez nutnosti přepnout v Matlabu pracovní adresář. Potom je teprve možné program spustit.

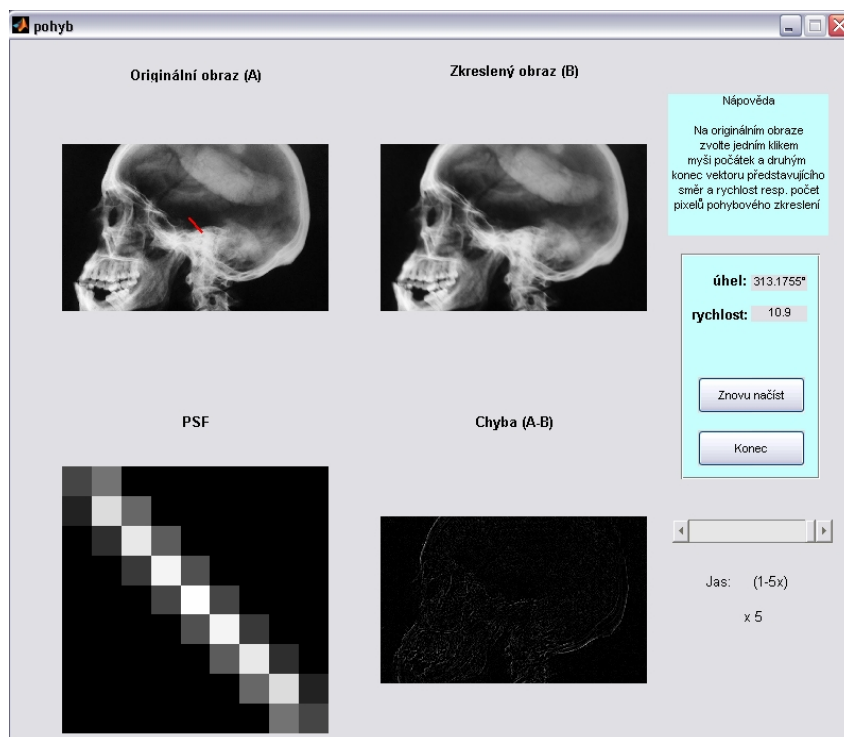
Druhým krokem je vytvoření vektoru, ze kterého se vypočítá úhel a rychlost pohybu. Rychlostí se zde rozumí počet pixelů, které ovlivní okolí pixelu, na který je aplikována PSF. Výpočet směru pohybu resp. úhlu zkreslení je počítán od 0 do 360°. Vektor vytvoříme interaktivně myší kliknutím na vstupní obraz. Takto určíme dva body, které budou krajními body vektoru. Po odkliknutí druhého bodu se spočítají potřebné konstanty, provede se vykreslení vektoru a následný výpočet PSF zkreslující funkce. Poté se provede konvoluce vstupního obrazu s vypočtenou PSF a následně se na druhé ose zobrazí výsledek.



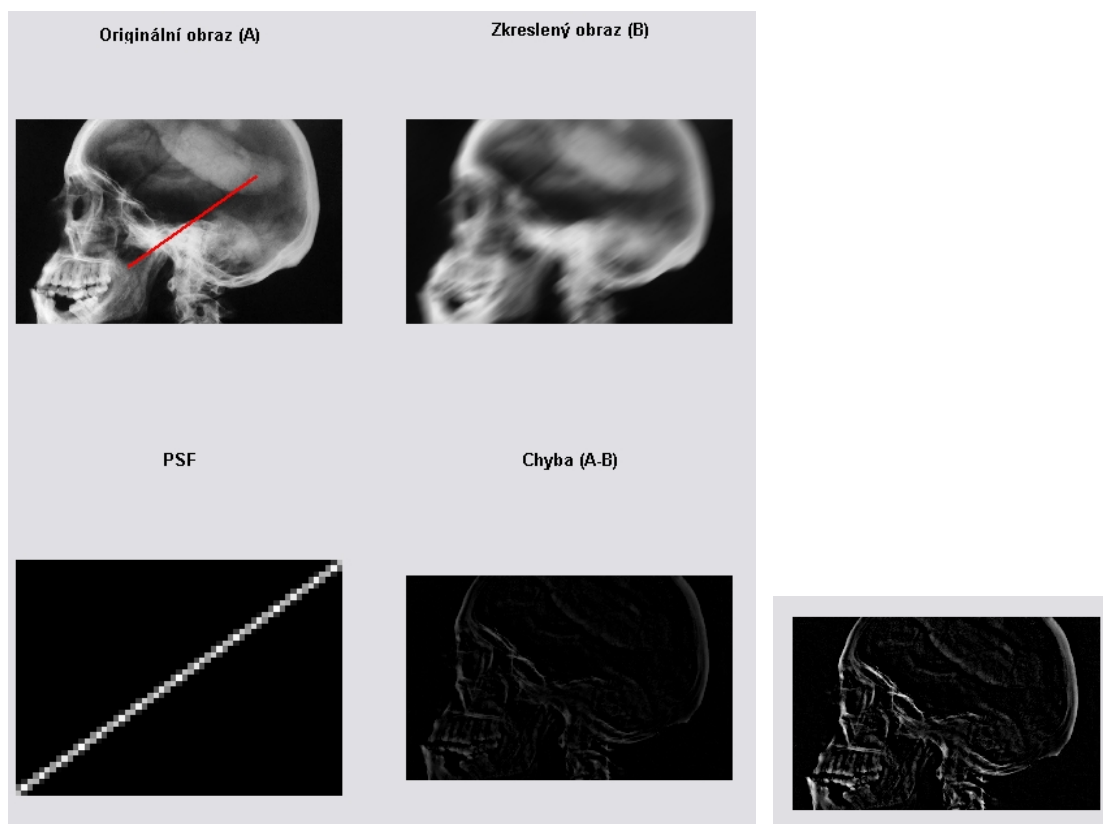
Obr.25: Blokové schéma programu Pohybová neostrost

Dialogové okno programu je vidět na obrázku Obr.26, ve kterém jsou čtyři zobrazovací oblasti pro originální obraz, zkreslený obraz, PSF zkreslující funkce a subtrakční obraz. V pravé části okna je pak zobrazení hodnot úhlu pohybu a jeho velikost v pixelech.

Subtrakční obraz je zde pro objektivní posouzení chyby zobrazení, resp. zkreslení obrazu. Velikost chyby je udána jasovou modulací obrazu. Jelikož hodnoty jasu v subtrakčním obrazu nejsou příliš vysoké, byl zde doplněn ovládací prvek, zvyšující kontrast v obraze. Výsledný obraz resp. jeho jasové hodnoty jsou násobeny zvolenou konstantou od 1 do 5. Tím lze docílit lepšího subjektivního pocitu zobrazení a i snazšího posouzení chyby. Jelikož jsou jasové hodnoty změněny oproti originálnímu obrazu, není již hodnocení kvantitativní, ale pouze subjektivní. Pomocí posuvníku lze měnit jas subtrakčního obrazu kontinuálně. Po zvolení nové konstanty jasu je obraz vždy překreslen. Tlačítkem „Znovu načíst“ je provedena nová volba zkreslujícího vektoru. Program lze doplnit o další obrazy pouhým zkopírováním souborů do složky programu.



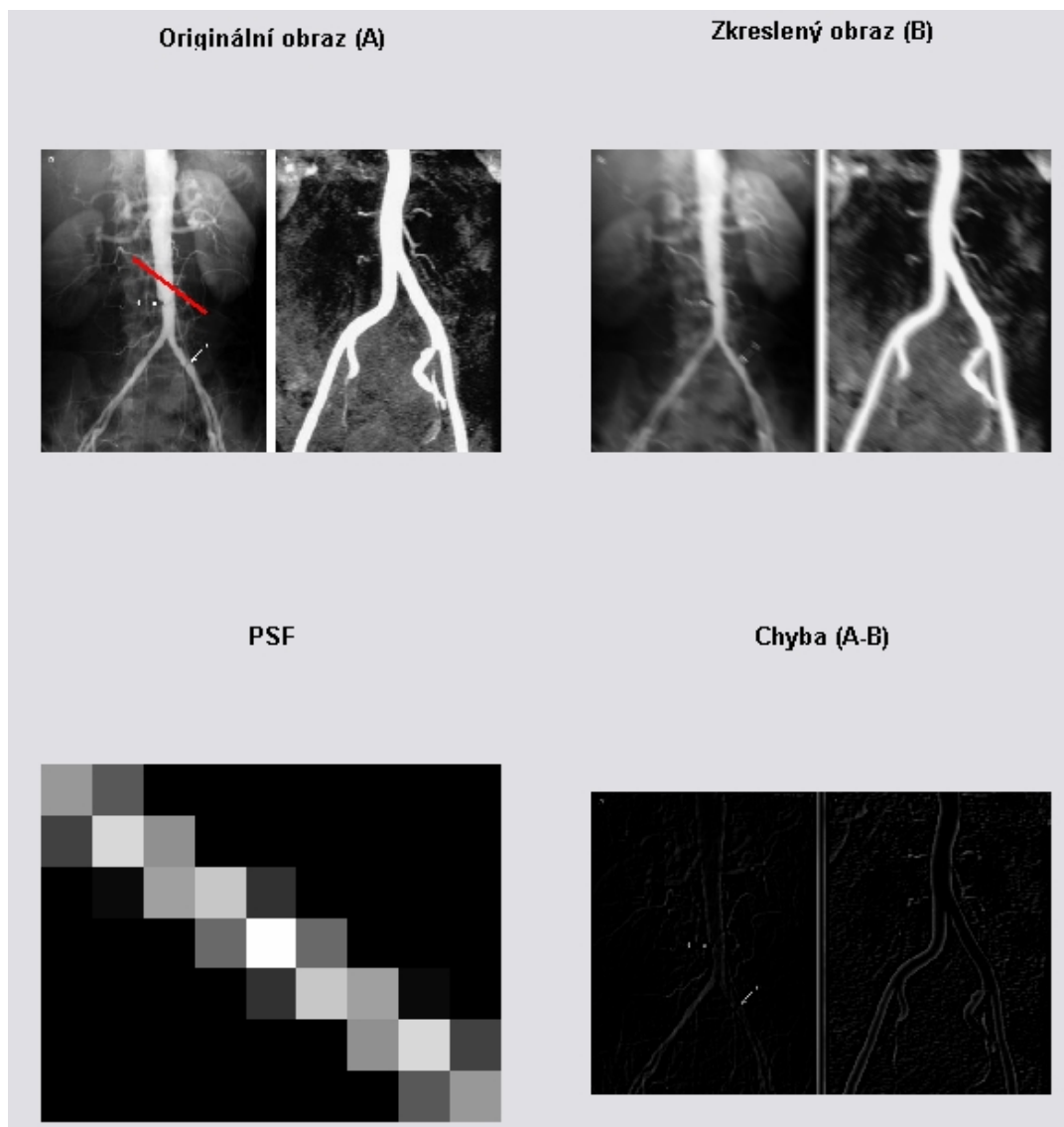
Obr.26 Dialogové okno modelu pohybového zkreslení



Obr.27 Simulace pohybového zkreslení –úhel 35°, Rychlost 69 pixelů, (vlevo) chyba - jas x1, (vpravo) chyba- jas x3

2.2.2 Výsledky simulací

Zde byla experimentálně ověřena funkčnost programu a zobrazení na několika obrazech a s různými tvary PSF. Z výsledných obrazů je zřejmá závislost velikosti zkreslení na rychlosti, resp. velikosti vektoru zkreslení. Ukázky simulovaných zkreslení jsou prezentovány na Obr. 21 - 22. Z provedených simulací je zřejmé, že čím jemnější struktury jsou přítomny v obraze tím je větší ztráta prostorové rozlišovací schopnosti v závislosti na velikosti vektoru.



Obr.28 Simulace pohybového zkreslení – úhel 323°, rychlost 10pixelů

2.3 Instalace programu

Program byl napsán v programovacím prostředí Matlab R2006b. Z důvodu kompatibility s předchozími a následnými verzemi byl spouštěcí skript zkompilován v jazyce C do samostatně spustitelného souboru. Nejedná se o kompletní kompilaci, kterou Matlab neumožňuje. Při kompilaci byly všechny soubory a skripty použité v programu zkopírovány do samostatné složky. Nehrozí zde nebezpečí chybějících toolboxů Matlabu apod. Je třeba poznamenat, že ke spuštění je stále třeba nainstalovaný Matlab libovolné verze, nebo Matlab Run-time Enviroment. Spuštění je možné pomocí souboru cvot.exe, dávkového souboru, zástupce, nebo spuštěním skriptu v Matlabu. Na přenosném médiu diplomové práce je v samostatné složce umístěn samotný program se všemi skripty, obrázky apod. Tu je možné pouze zkopírovat na pevný disk a ihned začít používat. Ve druhé složce jsou jednotlivé m-soubory a okna GUI prostředí pro možnost případných úprav.

3 Laboratorní úloha

Modelování časového vzorkování obrazového toku

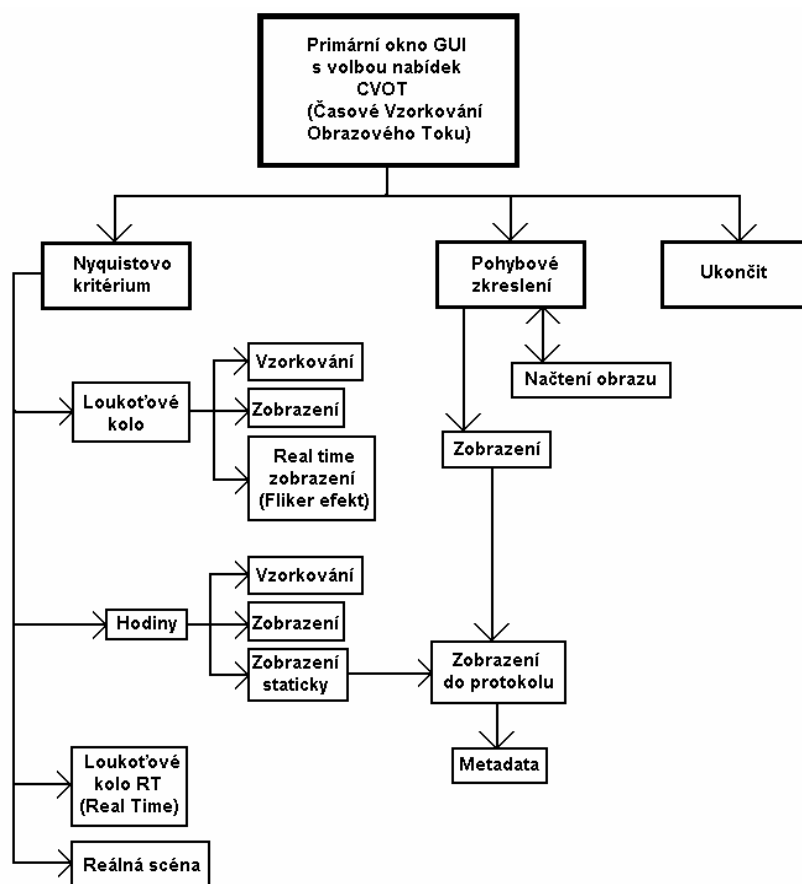
Základní idea:

- praktické využití teorie časového vzorkování obrazového toku
- získání psychosenzorického vjemu ze vznikajících jevů provázející vzorkování

Obsah laboratorního cvičení :

1. Seznámení s výukovým programem Modelování časového vzorkování obrazového toku (CVOT)
2. Ověření Nyquistova vzorkovacího teorému :
 - na modelu loukoťového kola
 - na modelu reálné scény
 - na modelu hodin
3. Ověření vlivu pohybové neostrosti na prostorovou rozlišovací schopnost

Ad1) Blokové schéma programu Modelování časového vzorkování obrazového toku (CVOT):



Obr.I: Blokové schéma programu

Výběr simulace úlohy se provádí pomocí kontextové nabídky v základním okně programu CVOT – Obr.II.



Obr.II: kontextové nabídky

Ad2)

Teoretický úvod

Za základní převod se považuje vzorkování signálu tedy časová diskretizace signálů. Ve většině případů se jedná hodnoty nějaké spojité funkce $f(t)$, která je spojitá v čase. Příkladem může být analogový signál reprezentovaný například sinusovým průběhem napětí na výstupu generátoru, který je následně přiveden na vstup A/D převodníku. Ten v určitých časových intervalech přečte hodnotu signálu v časových okamžicích $t_i, i = 0, 1, \dots, n$, přičemž je zpravidla vzorkování rovnoměrné. Vzdálenost jednotlivých hodnot od sebe je tzv. vzorkovací perioda T , takže [3]

$$f(n) = f(t_n) = f(nT). \quad (1)$$

Nyquistův vzorkovací teorém:

„Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného, signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byl vzorkován frekvencí alespoň dvakrát vyšší než je maximální frekvence rekonstruovaného signálu.“

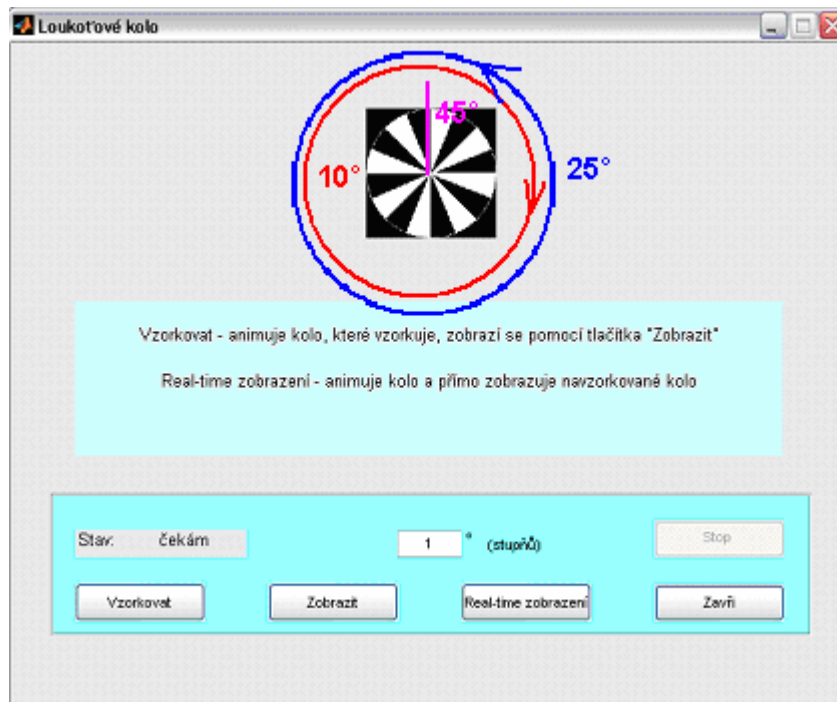
Vztah mezi vzorkovací frekvencí a frekvencí původního signálu je

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{vst}, \quad (2)$$

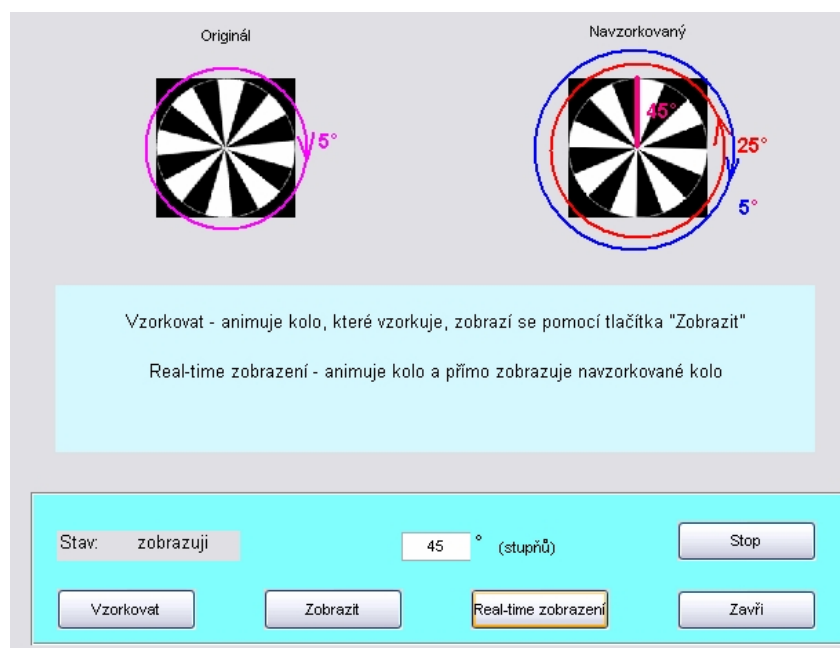
kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a f_{vst} je frekvence spojitého (vstupního) signálu.

a) Ověřte vzorkovací teorém na modelu loukoťového kola:

- V hlavním dialogovém okně CVOT vyberte z kontextové nabídky „Nyquistovo kritérium“ / „Loukoťové kolo“.
- Nastavte vzorkování po 10° , 25° , 45° .
- Stiskněte tlačítko „Vzorkovat“, sledujte okamžiky pořizování snímků.
- Pro zobrazení navzorkovaného dynamického vývoje scény stiskněte „Zobrazit“.
- Pro zobrazení v reálném čase stiskněte „Real-time zobrazení“, sledujte okamžiky pořizování jednotlivých vzorků, uvědomte si souvislost s flicker efektem.

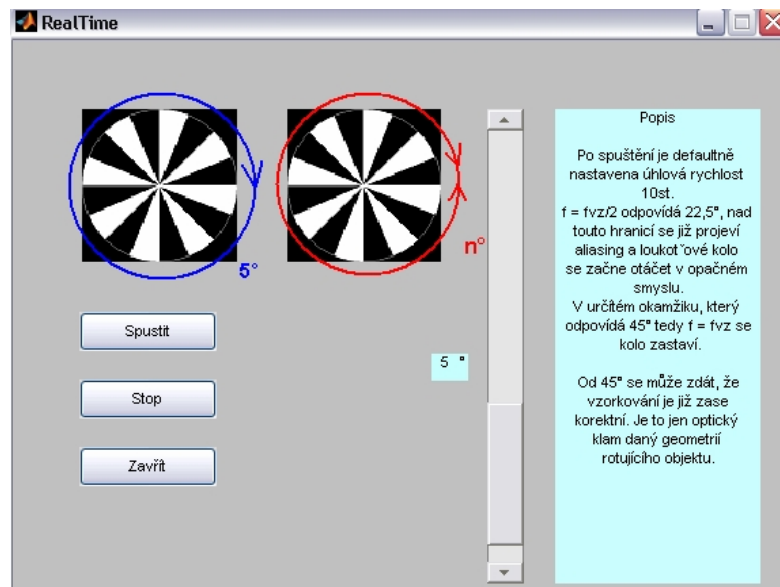


Obr.III. Model efektu loukoťového kola



Obr.IV: Model efektu loukoťového kola Real-time zobrazení (flicker efekt)

- V hlavním dialogovém okně CVOT vyberte z kontextové nabídky „Nyquistovo kritérium“ / „Loukot'ové kolo RT“.
- Stiskněte tlačítko „Spustit“.
- Pomocí posuvníku měňte konstantu po kolika stupních se vzorkuje.
- Pozorujte změny v korektnosti zobrazování při 10°, 22°, 25°, 45° atd.



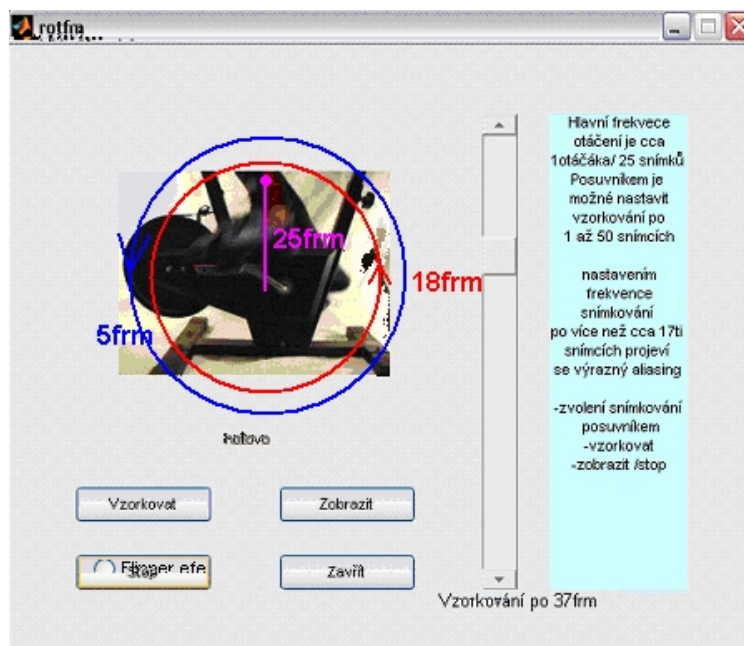
Obr.V: Interaktivní Real-time zobrazení loukot'ového kola

b) Ověřte vzorkovací teorém na reálné scéně (Obr.VI)

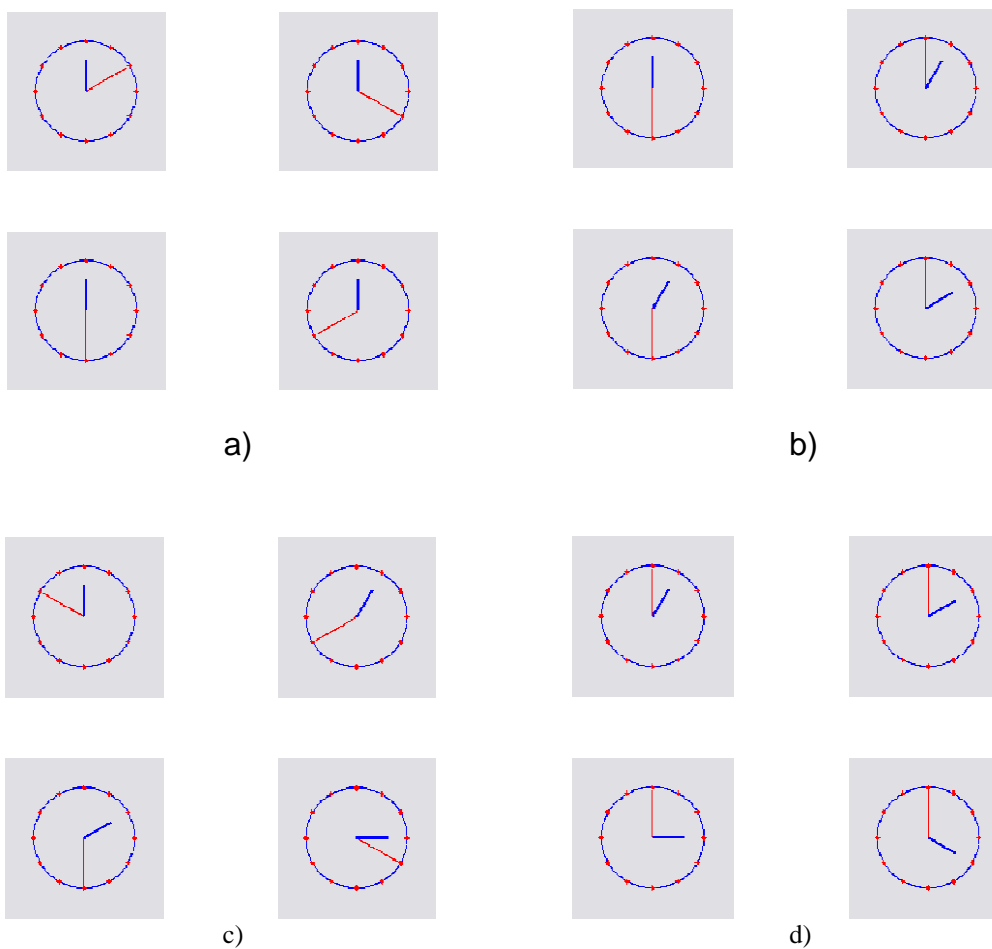
- V hlavním dialogovém okně CVOT vyberte z kontextové nabídky „Nyquistovo kritérium“ / „Reálná scéna“.
- Zadejte počet okének, po kterých se bude vzorkovat 5,18,25 frm.
- Stiskněte „Vzorkovat“.
- „Zobrazit“ –pozorujte korektnost zobrazení.

c) Ověřte vzorkovací teorém na modelu hodin (Obr.VII)

- V hlavním dialogovém okně CVOT vyberte z kontextové nabídky „Nyquistovo kritérium“ / „Hodiny“.
- Zadejte počet minut, po kterých se bude vzorkovat 10,30,50,60 min.
- Stiskněte „Vzorkovat“.
- „Zobrazit“ –pozorujte korektnost zobrazení.
- „Zobrazit staticky“ –uložte do protokolu.



Obr.VI Model reálné scény



Obr.VII: Vzorkování po a) 10min., b) 30min., c) 50min., d) 60min.

Ad 3)

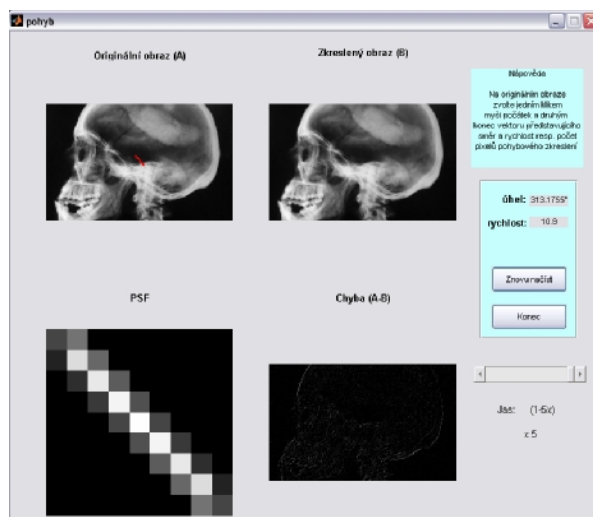
Teoretický úvod

Časová rozlišovací schopnost systému popisuje, jak se systém dokáže vypořádat s rychlými změnami ve scéně. Expoziční čas resp. časová apertura jakéhokoliv zobrazovacího systému není nulová a ani se nule limitně neblíží. Během snímání se bod scény, která se dynamicky vyvíjí v čase, posune z jedné pozice do druhé. Směr a vzdálenost je dána vektorem pohybu V . Na každém bodu se tedy podílí několik bodů scény, které jsou sejmuty během expoziční doby a každý z nich se podílí na výsledném jas bodu v obrazu. Během doby snímání t_a bod urazil určitou vzdálenost k bodů v obrazu s jasnem ($C_1 \dots C_k$). Výsledný jas bodu resp. pixelu můžeme vyjádřit jako [2]

$$P(i, j) = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k C_l . \quad (3)$$

Ověření vlivu pohybové neostrosti na prostorovou rozlišovací schopnost

- V hlavní dialogovém okně CVOT vyberte z kontextové nabídky „Pohybové zkreslení“ / „Načíst obrázek“ a zvolte pracovní obraz.
- Ze stejné nabídky poté zvolte „Spustit“.
- Na zobrazeném originálu zvolte počáteční bod vektoru klikem na levé tlačítko myši, poté zvolte konečný bod vektoru stejným způsobem.
- Zobrazení se provede automaticky.
- U subtrakčního obrazu je možné upravit jas pomocí posuvníku.
- Vyzkoušejte různé kombinace a uvědomte si souvislosti mezi velikostí, směrem vektoru zkreslení a velikostí chyby resp. ztráty prostorového rozlišení.
- Vybrané modely uložte do protokolu.



Obr.VIII: Model pohybového zkreslení

Použitá literatura

- [1] DRASTICH, A. Tomografické zobrazovací systémy. Skripta. Brno: VUT FEKT, ÚBMI, 2004.s. 0-206. ISBN: 80-214-2788-4.
- [2] DRASTICH, A. Netelevizní zobrazovací systémy. Netelevizní zobrazovací systémy. Brno: VUT v Brně, FEI, ÚBMI, 2001. s. (174 s.)ISBN: 80-214-1974-1.
- [3] JAN, J., Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů, VUT IUM, Brno 2002 s. (427s.), ISBN 80-214-1558-4.

Závěr

V předložené diplomové práci byl řešen problém časového vzorkování obrazového toku. Byl zpracován teoretický úvod do problematiky signálů, jejich diskretizace a doprovázejících zkreslení signálů. Ten může být použit jako stručný přehled problematiky vzorkování signálů při studiu zobrazovacích systémů.

V praktické části byl vytvořen program pro podporu výuky zabývající se zobrazovacími systémy. Program by měl nejen názornou, ale i poutavou formou, vysvětlit jevy, vznikající při nekorektním časovém vzorkování obrazového toku. Studenti si při řešení úloh uvědomí souvislosti vzorkovací frekvence s frekvencí danou dynamickým vývojem scény a asociují si některé situace, se kterými se mohou setkat v reálném prostředí.

Program se podařilo zkonstruovat jako přehledný software a s intuitivním ovládáním, časově nenáročný a dostatečně názorný. Programovací prostředí Matlab poskytuje mnoho užitečných funkcí, včetně na ovládání příjemného prostředí GUI. Jeho univerzálnost se ale v některých situacích projevila negativně. Především operace v reálném čase a zpracování velkého objemu dat činila i na poměrně výkonném hardwaru problémy. Vyskytly se i interní chyby v předprogramovaných skriptech Matlabu.

Posledním úkolem bylo definovat zadání laboratorního cvičení. V rámci výuky si studenti vytvoří laboratorní protokol ze simulací vytvořeným programem. Jelikož ve většině případů simulací není možné zachytit dynamický vývoj scény statickým způsobem, je nutné popsat jevy v protokolu slovně. Případně upravit obrázky ze zadání.

Literatura

- [1] NEVŘIVA, P., Analýza signálů a soustav, BEN technická literatura, Praha 2000, ISBN 80-7300-004-0.
- [2] ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B. Matlab – začínáme se signály, BEN technická literatura, Praha 2004, ISBN 80-7300-200-0 .
- [3] JAN, J., Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů, VUTUM, Brno 2002 s. (427s.), ISBN 80-214-1558-4.
- [4] DRASTICH, A. Tomografické zobrazovací systémy. Skripta. Brno: VUT FEKT, ÚBMI, 2004.s. 0-206. ISBN: 80-214-2788-4.
- [5] DRASTICH, A. Netelevizní zobrazovací systémy. Netelevizní zobrazovací systémy. Brno: VUT v Brně, FEI, ÚBMI, 2001. s. (174 s.)ISBN: 80-214-1974-1.
- [6] OŽANKA, Š., BEDNAŘÍK , R., ŠTULA, T., PENHAKER, M., Využití Matlabu ve výuce signálů a soustav v biomedicínckém inženýrství na katedře měřicí a řídicí techniky na VŠB –TU Ostrava. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2002.
- [7] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. Signály a soustavy. Brno: VUT v Brně, 2003. s. 1-165. ISBN: REL117.
- [8] DELGUTTE, B., Biomedical Signal and Image Processing, 2007 s.(26s.), Harvard-MIT Division of Health Sciences and Technology.
- [9] REKLEITIS, I. Visual motion estimation based on motion blur interpretation. McGill University, Montreal, 1995.
- [10] FIŘT, J., HOLOTA, L., Digitalizace a zpracování obrazu, článek MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084, s(5s.), 2002.
- [11] OŽANA, Š., BEDNARTÍK, R., ŠTULA,T., PENHAKER,M., Využití Matlabu ve výuce signálů a soustav a v biomedicínském inženýrství, VŠB – TU, FEI, Ostrava, 2001, s.(6s.).
- [12] Köthe, U., Multidimensional Image ProcessingInterdisciplinary, Center for Scientific Computing (IWR)University of Heidelberg, April 2008 s(30s.), presentation.

Internetové zdroje

- [13] HRÁDEK, J., Aliasing'n aliasing, 2002, dostupné na http://herakles.zcu.cz/education/apg_2002_2003/hradek/html/Aliasing.html
- [14] BACH, M., The wagon-wheel effect. 2007, dostupné na http://www.michaelbach.de/ot/mot_wagonWheel/index.html